ABSCHLUSSBERICHT

SOLAR*SHELL*

Die parametrisch optimierte Fassade als Energiequelle

Forschungsstelle:	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig ai:L Architektur-Institut Leipzig Karl-Liebknecht-Str. 132 04277 Leipzig
Förderkennzeichen:	SF-SWD-10.08.18.7-15.56
Projektleiter:	Prof. Frank Hülsmeier
Projektbearbeitung:	Adrian Heller, Dipl.-Ing. (FH) Stefan Huth, M. A. | Architekt Sarah Knechtges, M. Sc. Jana Reise, Dipl.-Ing. (FH)
Laufzeit:	01.12.2015 bis 30.11.2017
Ort, Datum:	Leipzig, 15.12.2017

GEFÖRDERT VOM:

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

IM RAHMEN VON:

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU

FÖRDERHINWEIS

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt und Raumforschung unter dem Förderkennzeichen SF-SWD-10.08.18.7-15.56 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

PROJEKTPARTNER

BOBO Produktions- und Vertriebsgesellschaft mbH
An der Hebemärchte 24
04316 Leipzig-Baalsdorf

Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH
Mühlenstraße 62
13187 Berlin

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Otto-Eißfeldt-Straße 12
06120 Halle/Saale

SGB Steuerungstechnik GmbH
Marschnerstraße 13
04109 Leipzig

SolarWorld Innovations GmbH
Bethelsdorfer Str. 111 a
09599 Freiberg

INHALT

1 Einleitung ... 3

2 Grundlagen ... 4

2.1 Parametrisch-generatives Entwerfen ... 4

2.2 Evaluierung von PV-Technologien ... 6

2.3 Gebäudeintegrierte Photovoltaik ... 10

2.3.1 Rahmenbedingungen & Potentiale ... 11

2.3.2 Lebensdauer ... 12

2.4 Eigenschaften & Potentiale verschiedener Fassadenmaterialien & -systeme ... 12

2.4.1 Fassadenmaterialien ... 12

2.4.2 Oberflächenbeschaffenheit von Fassadenmaterialien ... 18

2.4.3 Fassadenarten ... 21

2.4.4 Kombinationspotentiale ... 25

2.5 Ökonomische & ökologische Kriterien ... 26

2.5.1 Ökonomische Kriterien ... 26

2.5.2 Ökologische Kriterien ... 27

2.6 Kontaktierungs- & Verschaltungsprinzipien ... 29

2.7 Baurechtliche Voraussetzung ... 32

2.8 Zusammenfassung der Grundlagen ... 33

3 Voruntersuchungen ... 34

3.1 Entwurf und Gestaltungsansätze solar optimierter Gebäudehüllen ... 34

3.1.1 Allgemeine Geometriestudien ... 34

3.1.2 Kleinmaßstäbliche solare Vorberechnungen ... 37

3.1.3 Fallstudien im urbanen Kontext ... 40

3.2 Kombinationsmöglichkeiten & Verbindungsarten ... 46

3.3 Kombinationskonzepte ... 48

3.3.1 Metallfassade & Photovoltaik ... 48

3.3.2 Ziegelfassade & Photovoltaik ... 50

3.3.3 Sichtbetonfassade & Photovoltaik ... 50

3.4 Zusammenfassung der Voruntersuchungen ... 51

4 Lösungsvarianten und Bewertung 52
4.1 Strategie parametrisch-generativer Optimierung am Beispiel einer gefalteten Fassade 52
4.2 Vergleich der optimiert ausgerichteten PV mit einer vertikal-planar ausgerichteten PV 61
4.3 Architektonische Entwurfsvarianten 65
4.3.1 Variante A | Gefaltete Fassade mit integrierter Photovoltaik 65
4.3.2 Variante B | Mauerwerksfassade mit steinintegrierter Photovoltaik 67
4.3.3 Variante C | Kiemenstruktur-Fassade mit auflaminierter Photovoltaik 70
4.3.4 Zusammenfassung: Vergleich der Varianten 71

5 Ausarbeitung der Entwurfsvariante „Gefaltete Metallfassade mit integrierter Photovoltaik" 73
5.1 Konstruktiver Aufbau des PV-Moduls 73
5.2 Konstruktiver Aufbau des Fassaden-Basismoduls 74
5.3 Fügen von Photovoltaik- & Basismodul 76
5.4 Eigenschaften der Einzelkomponenten und deren Zusammenspiel 77
5.5 Fassadenbefestigung 78
5.6 Demonstrator 83
5.6.1 Demonstratorplanung 83
5.6.2 Herstellung von Testelementen 93
5.6.3 Finaler Demonstrator 95

6 Planungstool für Architekten 98

7 Fazit 100

8 Quellennachweise 101

1 Einleitung

Mit dem 2011 beschlossenen Ausstieg aus der Atomenergie hat die Bundesregierung ein neues Energiekonzept für Deutschland auf den Weg gebracht, das neben Maßnahmen zur umfassenden Energieeinsparung auch Maßnahmen zum beschleunigten und verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien vorsieht. In diesem Zuge soll bereits ab 2020 der Gebäudestandard „Niedrigstenergiehaus" für alle Neubauten verbindlich werden, der alternative Energieerzeuger im oder in der Nähe des Gebäudes vorschreibt (Europäisches Parlament, 2010). Zudem sollen bis 2050 alle Gebäude „klimaneutral" sein, also den eigenen Energiebedarf ausschließlich aus erneuerbaren Energien decken können (Deutsche Bundesregierung, 2017). Daraus ergibt sich ein großes Potential für gestalterisch hochwertige gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV), deren Ertrag durch Ausrichtungsoptimierung noch einmal signifikant erhöht werden kann. Photovoltaik-Module (PV-Module), wie sie am Markt derzeit verfügbar sind, können durch ihre eingeschränkte Farb-, Form- und Materialpalette noch zu wenig auf architektonische Wünsche und Vorgaben reagieren. Zudem erzeugen fassadenintegrierte PV-Flächen derzeit deutlich weniger Energie als vergleichbare Aufdach- oder Freiflächenanlagen, da ihre volle Leistungsfähigkeit durch die vertikale Ausrichtung nicht ausgeschöpft werden kann. Diese Faktoren führen neben anderen dazu, dass die allgemeine Akzeptanz von BIPV gering und ihr Marktanteil mit etwa 2 % (SolarServer, 2017) sehr klein ist. Es bedarf neuer architektonisch hochwertiger Fassadenkonzepte, die dennoch einen relevanten solaren Ertrag ermöglichen und damit die Energiewende effizient unterstützen können.

Das Projekt SOLAR*shell* widmete sich der Entwicklung solcher innovativer BIPV-Lösungen, die durch ganzheitliche Entwurfs- und Gestaltungsansätze die PV-Komponenten in die Gebäudehülle integriert und sie damit zu ihrem festen Bestandteil macht. Im Projekt wurde - entgegen aktuellen Trends - auf Kleinteiligkeit der PV-Module gesetzt. Diese können so in die Gebäudehülle integriert werden, dass die Materialität des Fassadenmaterials erhalten bleibt und sie durch parametrisch optimierte Ausrichtung zur Sonne zudem ein Leistungsmaximum erbringen. Das parametrisch-generative Entwerfen als Symbiose zwischen Computerprogrammierung und Architektur war ein wichtiger Bestandteil des Projektes. Mit ihm wurden u. a. verschiedene Lösungsansätze entwickelt, welche zu Fassadenentwürfen ausgearbeitet werden konnten. Eine im Projekt umgesetzte Demonstratorfassade belegte die praktische Umsetzbarkeit des verfolgten Ansatzes.

Gebäudeintegrierte PV wird zukünftig mehr als nur Strom erzeugen: Als Teil der Fassade wird sie genauso auch optischen, haptischen und bauphysikalischen Ansprüchen gerecht werden können.

2 Grundlagen

2.1 Parametrisch-generatives Entwerfen

Das parametrisch-generative Design ist eine Entwurfsmethodik, bei der das Ergebnis, bspw. ein Modell oder eine Visualisierung, basierend auf Algorithmen und Parametern erzeugt wird. Algorithmen sind Rechenvorgänge, die nach einem bestimmten, sich wiederholenden Schema ablaufen (DUDEN, 2016). Die darin enthaltenen Parameter sind entweder dynamische oder konstant gehaltene Größen (DUDEN, 2016). Parameter bilden die Eingangsgrößen für Algorithmen, deren Ergebnisse ihrerseits wieder Eingangsgrößen für weitere Algorithmen sein können. Durch die Entwurfsmethodik des parametrisch-generativen Designs können diese Größen komplex miteinander verknüpft werden, z. B. in Evolutions- und Wachstumsprozessen.

Vom CAD zum AAD

Ausgangspunkt für das generative Entwerfen bildet das CAD (Computer Aided Design), das programm- und rechnerunterstütztes Konstruieren eines Gebäudes oder Gegenstands in 2D und 3D erlaubt. Bauprojekte entstehen heute fast ausschließlich am Rechner, da so u. a. eine gewerkübergreifende Planung und 3D-Visualisierung eines Gebäudes möglich ist. In CAD-Software implementierbare Skript-Editoren erweitern die Grenzen des CAD, da sie Geometrien erzeugen können, die über das „statische" Modellieren von Formen und Strukturen hinausgehen. Die Operationen und Befehle im CAD werden Teil eines Codes, mit dem komplexe Zusammenhänge auf Grundlage mathematischer Beschreibungen dargestellt werden können. Somit wird CAD zu AAD (Algorithm Aided Design) (Khabazi, 2012). Den Prozess des parametrisch-generativen Gestaltens verdeutlicht Abb. 1.

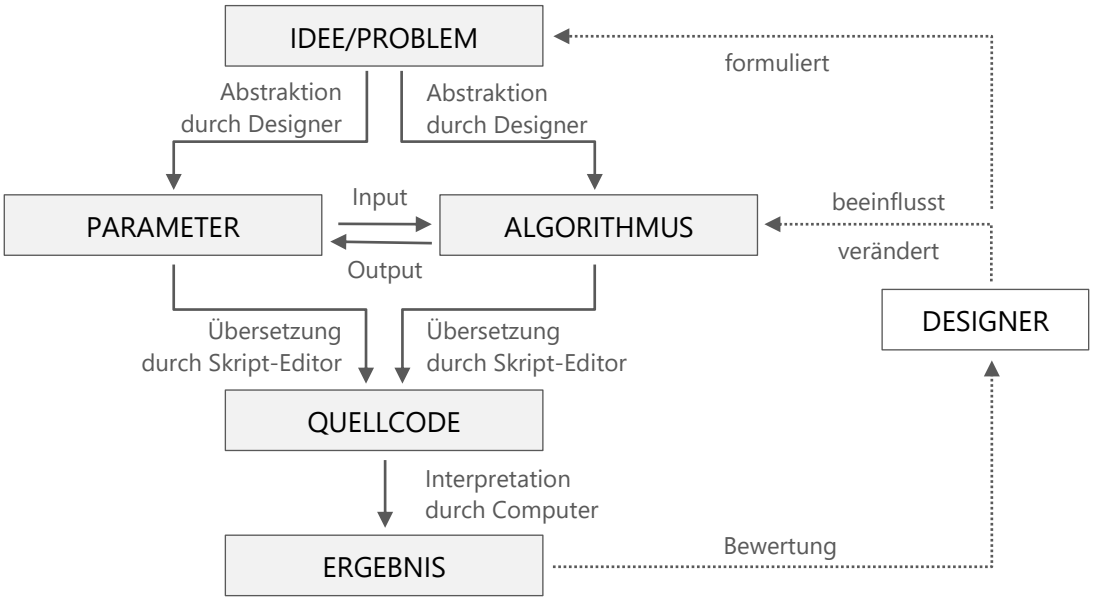


Abb. 1: Prozess des parametrisch-generativen Gestaltens | auf Grundlage von: (Bohnacker, Groß, Laub, & Lazzeroni, 2010)

Das AAD bietet völlig neue Werkzeuge des Entwerfens und ermöglicht u. a.:
- Das Arbeiten mit dynamischen Parametern
- Einen hohen Varianten-Output bei relativ geringem Zeitaufwand ggü. traditionellem CAD-Modeling
- Die Erzeugung von komplexen Geometrien
- Den Einsatz von Simulationsalgorithmen, welche ein direktes Feedback zum Entwurf geben, wodurch dessen Parameter direkt beeinflusst werden können
- Iterative Operationen, die eine Optimierung des Entwurfes hinsichtlich bestimmter Zielparameter ermöglichen

Software-Tools

Für Designer und Architekten stehen verschiedene CAD-Programme (z. B. „Rhinoceros", „3ds Max" oder „Maya") sowie Script-Editoren (z. B. „RhinoScript", „Grasshopper for Rhinoceros" oder „Processing") zur Verfügung, mit welchen AAD möglich ist. Hier hat sich in den letzten Jahren die Software „Rhinoceros" in Kombination mit dem grafischen Algorithmus-Editor „Grasshopper" aufgrund seiner einfachen Handhabbarkeit etabliert. Im Vorhaben wird ebenfalls mit diesen Programmen gearbeitet; alle eingesetzten Softwares sind im Folgenden aufgeführt:

<u>Rhinoceros 5</u>
- Basisprogramm, in dem u. a. Freiformen in einfacher Art umgesetzt werden können
- gute CAM-Schnittstelle für Rapid Prototyping-Prozesse
- hohe Kompatibilität mit anderer CAD-Software

<u>Grasshopper for Rhino</u>
- Freies Open-Source Plug-In für parametrisch-generative Entwurfsprozesse mit grafischer Benutzeroberfläche
- eigene Programmierungen und Optimierungsprozesse möglich

<u>DIVA</u>
- Freies Plug-In für Rhino und Grasshopper
- u. a. thermische-, Tageslicht-, Blend- und Solarstrahlungssimulationen
- nutzt das von Robinson und Stone entwickelte „GenCumulativeSky"-Modul, welches sehr schnelle Berechnungen und somit ein direktes Feedback im Entwurfsprozess ermöglicht

<u>Ladybug</u>
- Freies Open-Source Grasshopper-Plug-In zur Simulation der Gebäudeumgebung
- Import von Standard-EnergyPlus-Wetterdaten (*.epw) in Grasshopper
- Ermöglicht eine interaktive grafische Darstellung verschiedener Umwelteinflüsse (Licht- und Verschattungsanalyse, Wärme- und Strahlungseinwirkungen, etc.)
- nutzt das sog. „Gendaymtx"-Modul von „Radiance" zur Berechnung, ist noch schneller und somit direkter als „DIVA", kann jedoch keine Reflektionen abbilden

Parameter & Algorithmen für die optimierte Gebäudehülle

Um die angestrebte solare Fassadenoptimierung in der Software umsetzen zu können, werden verschiedene Arten von Algorithmen eingesetzt, wobei nach folgendem Prinzip vorgegangen wird: Um eine möglichst große Gestaltungsvariabilität zu erhalten, wird bereits die Grundgeometrie des Gebäudes durch einen *Geometrie-Algorithmus* (z. B. Fraktale oder Voronoi) definiert. Als Input werden dabei statische und/oder dynamische geometrische Parameter genutzt, die den Körper und seine Lage im Raum beschreiben. Mithilfe von *Analyse-Algorithmen* (z. B. Solarstrahlung, Verschattung) kann die Geometrie unter Einbeziehung von z. B. Umgebungs- oder Zeitparametern bewertet werden. Durch die Kopplung mit einem *Optimierungs-Algorithmus* (z. B. Nachbilden von Evolutionsprozessen) und dem Verknüpfen mit einem Zielparameter (z. B. maximale solare Erträge über einen definierten Zeitraum) lässt sich die Geometrie im Rahmen der definierten Parametergrenzen schließlich variieren und so lange durchspielen, bis ein Optimum erreicht ist (vgl. Abb. 2).

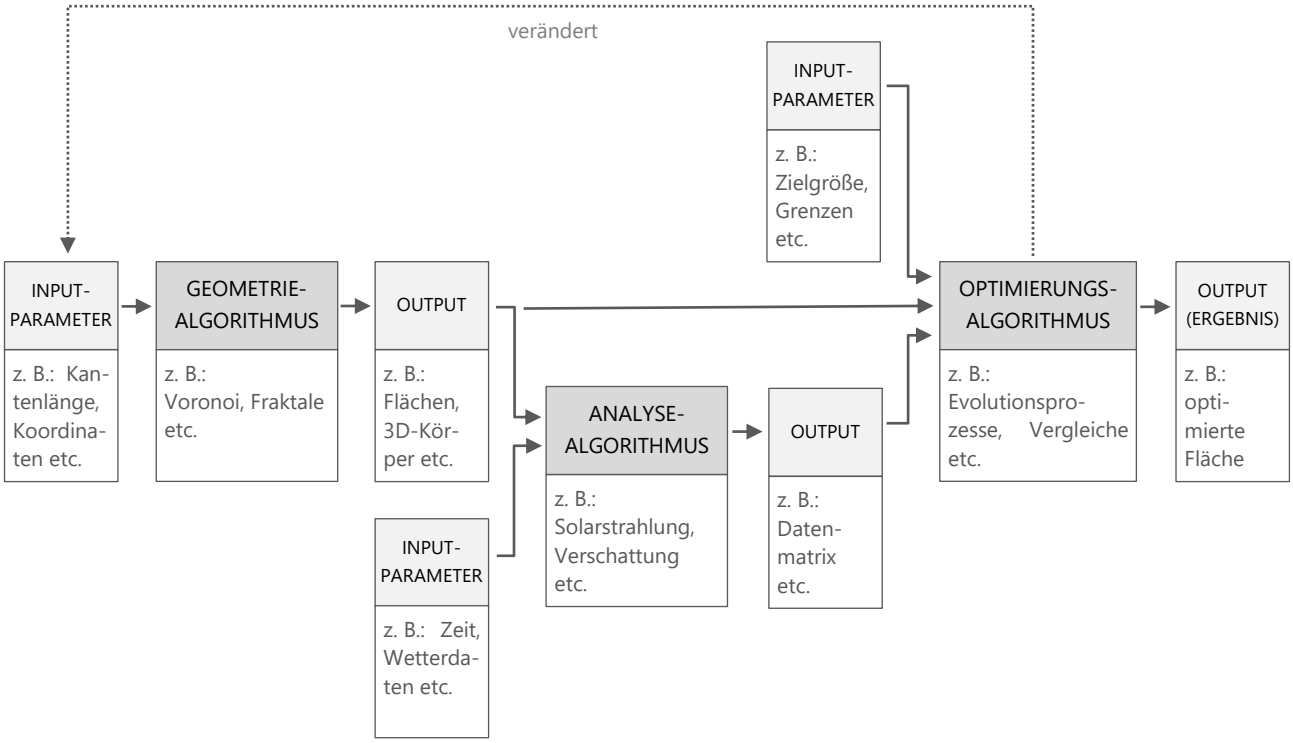


Abb. 2: Zusammenspiel von Parametern und den unterschiedlichen Algorithmen

2.2 Evaluierung von PV-Technologien

Der Einsatz von PV-Technik außerhalb der Raumfahrt kann auf eine inzwischen fast 30-jährige Geschichte zurückblicken. In dieser Zeit wurden verschiedenste Technologieansätze erforscht und weiterentwickelt. Einer der ersten und mit knapp 90 % Marktanteil derzeit auch der bedeutendste ist die kristalline PV-Zelle. Anhand dieser Technologie soll im Folgenden der Aufbau eines Standard-PV-Moduls erläutert werden.
Mehrere PV-Zellen in den Abmaßen von etwa 10 x 10 bis 20 x 20 cm werden jeweils in einem Solarmodul zusammengefasst und so verschaltet, dass sich ihre Einzelspannungen zu einer nutzbaren Spannung addieren. Zum Schutz vor verschiedenen Umwelteinwirkungen werden sie verkapselt.

Zur statischen Stabilisierung wird das System auf ein Trägermaterial aufgebracht, welches meistens Glas aber auch Plexiglas, Metall oder Kunststofffolie sein kann (BINE Informationsdienst, 2005).
Die Abb. 3 zeigt den Aufbau einer Standard-Glas-Folie-Solarzelle.

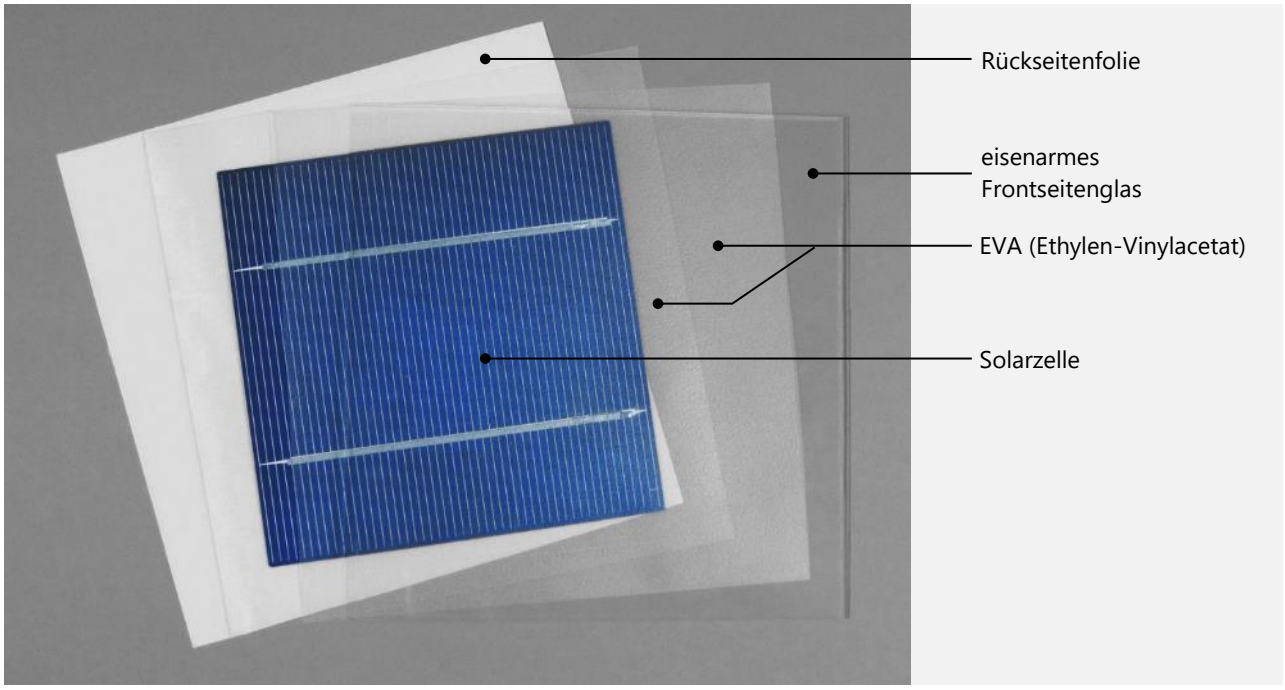


Abb. 3: Aufbau einer Standard-Solarzelle | Quelle: Fraunhofer ISE

Zelltechnologien

Für eine Evaluierung der derzeit am Markt verfügbaren PV-Technologien wurden diese hinsichtlich ihrer Eigenschaften sowie Vor- und Nachteilen einander gegenübergestellt (vgl. dazu Tab. 1). Über die verglichenen kristallinen, Dünnschicht- und organischen Photovoltaikzellen (OPV) hinaus bestehen weitere Technologien, wie Tandem- oder Grätzel-Solarzellen.

Tandem-Solarzellen sind Kombinationen verschiedener Zelltypen, die in verschiedenen Lagen das Lichtspektrum effektiver für die Stromerzeugung ausnutzen. Diese können aus kristallinen Zellen, Dünnschicht- oder organischen Photovoltaikzellen aufgebaut sein (energie-experten.org, 2016). Durch den Einsatz von Fresnel-Linsen in einem Konzentratorsystem ist es darüber hinaus möglich, im Labor Zellen mit Wirkungsgraden über 40 % zu erzeugen (Fraunhofer ISE, 2016). Diese aufwendig herzustellenden Zellen befinden sich im Laborstadium und kommen aktuell hauptsächlich für Spezialanwendungen in Frage. Die Grätzel- oder Farbstoffsolarzelle besticht durch ihre günstige Herstellung und die Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten, indem sie ähnlich wie Farbe verwendet werden kann. Derzeit sind jedoch noch Probleme der Langzeitstabilität zu klären, um zur Marktreife zu gelangen (Universität Freiburg, 2016).

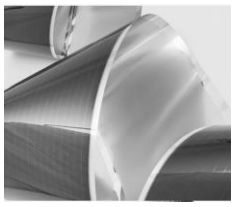
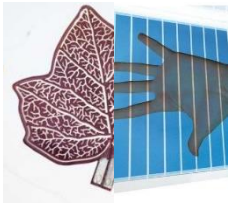
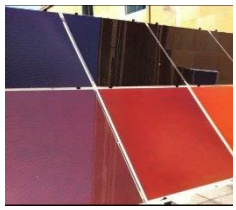
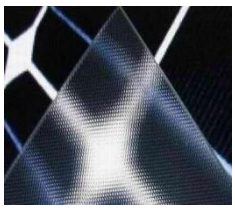
Tab. 1: Zelltypen

KRISTALLINE SILIZIUMZELLEN		DÜNNSCHICHTSOLARZELLEN		NANOSOLARZELLEN
monokristallin	polykristallin	Silizium	Verbindungs-halbleiter	organische Halbleiter (OPV)
BESCHREIBUNG				
• Wafertechnik: runde bis quadratische Einzelscheiben • Scheibendicke 0,2 mm, Kantenlänge 10 - 15,6 cm • ca. 90 % Marktanteil		• Vakuumtechnik, Galvanik: in der Regel vollflächige Substratbeschichtung • Schichtdicke 0,5 - 5 µm, Breite der Zellstreifen 0,5 - 17 mm • ca. 10 % Marktanteil, steigend		• Druckverfahren • Nanostruktur • Pilotstadium
VORTEILE				
• störungsunanfällig • hohe Effizienz • hohe Lebensdauer • kostengünstig • einfache Herstellung • ausgereifte Technologie		• größeres Gestaltungspotential • geringerer Energie- und Materialverbrauch • höherer Automatisierungsgrad der Fertigung • > Kostenreduktion • wesentlich toleranter auf Teilverschattung • geringes Gewicht		• Geringere Herstellungskosten • Flexibilität & Transparenz • Energieeffiziente Herstellung • nicht hitze- oder kälteempfindlich
NACHTEILE				
• Einbußen bei diffusem Licht & hohen Temperaturen • unflexible Formgestaltung • schwer		• niedrigerer Wirkungsgrad • etwas geringere Lebensdauer • anfällig für Feuchte & UV-Strahlung • Hohe Kosten für Verkapselung		• geringerer Wirkungsgrad • Langzeitstabilität noch ungenügend • noch keine industrielle Fertigung
WIRKUNGSGRAD				
Standardzellen: 12 - 16 % | 21,6 %*	Standardzellen: 1,15 - 15 % | 20,3 %*	amorphe Zellen: 5 - 7 % | 12,2 %*	CIS[1]: 14 - 17 % | 20 %*	Standardzellen: 4 - 9 % | 12 %*
Hochleistungszellen: 16 - 20 % | 24,7 %*		mikrokristalline Zellen: 5 - 7 % | 15,2* %	CdTe[2]: 6 - 11 % | 16,5 %*	
Hybrid-Modul: 16 - 17,5 % | 23,8 %*		mikromorphe Zellen: 7 - 9 % | 13 %*		
FARBE				
dunkelblau bis schwarz	mittel- bis hellblau	rotbraun bis schwarz	dunkelgrün bis schwarz	flexible Färbung
* Laborwerte | [1] Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid | [2] Cadmiumtellurid				

Auf Grundlage von: (C. Ipser, 2012, S. 9) & (Weller, Hemmerle, Jakubetz, & Unnewehr, 2009, S. 14-22)

Der Vergleich der verschiedenen Zelltypen zeigt die individuellen technologiebedingten Unterschiede auf. Es wird deutlich, dass es (noch) keine „Supertechnologie“, aber auch keine mit per se ungünstigen Eigenschaften für den Fassadeneinsatz gibt. Für jede Entwurfssituation muss deshalb im jeweiligen Bebauungskontext, den lokalen Gegebenheit und der geplanten Formgebung individuell entschieden werden, welche Technologie geeignet ist.
Bezüglich ihrer Formatgestaltung werden Standardmodule aktuell in Rechteckformaten in den Größen von 640 x 806 mm bis 1640 x 992 mm angeboten. In den Modulen werden aus wirtschaftlichen Gründen sowie aus Gründen der Leistungsaufnahme zwischen 36 und 72 Zellen miteinander gekoppelt. Solarmodule sind damit fertig verschaltete, einsatzbereite Bauelemente. Sie ermöglichen dadurch nur einen geringen Gestaltungsspielraum bezüglich der Modulverschaltungstechnologie und Zellengeometrie. Jedoch wird derzeit intensiv an der Veränderung des PV-Modul-Designs geforscht, sodass die Oberflächenbeschaffenheit von kristallinen PV-Zellen, aber auch OPV zunehmend wandelbar sind. Beispiele dazu sind in der folgenden Tab. 2 ersichtlich. Diese Entwicklungen ermöglichen eine zunehmend größere Gestaltungsvarianz der Photovoltaik-Komponenten.

Tab. 2: Gestaltungsmöglichkeiten verschiedener PV-Technologien | Bildquellen siehe Kapitel 0

		GESTALTUNGSMÖGLICHKEITEN			
		Erscheinungsbeispiel	Farbvarianz	Oberflächenstruktur	Weitere Varianten
PV -TECHNOLOGIE	Organische PV	flexible OPV 	farbige OPV-Zellen	- / -	freie Form | transparent 
	Silizium- Glas-Glas-PV	mono- & poly-kristalline Zellen	farbige kristalline PV-Zellen 	strukturiertes Glas (matt) 	Muster

Farbveränderung von PV-Zellen

Bei Dünnschicht-, mono- und polykristallinen PV-Zellen ist die Farbigkeit der Oberfläche durch die Wahl der PV-Technologie sowie durch die Verwendung farbiger Deckgläser oder Zwischenfolien veränderbar (Beispiele siehe Tab. 2). Monokristalline PV-Zellen verfügen standardmäßig über eine graue Oberfläche. Durch die Aufbringung einer entspiegelnden Antireflektionsbeschichtung auf die PV-Zelle färbt sich die Zelle dunkelblau bis schwarz. Auch durch die Veränderung der Schichtdicke kann der Farbton verändert

werden. Dabei hat die Farbe der PV-Zelle einen Einfluss auf den Wirkungsgrad des PV-Moduls. Ein Beispiel für die Veränderung des Wirkungsgrades eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls mit einer Größe von 1,63 x 9,95 m und 60 PV-Zellen (je 0,156 x 0,156 m) ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Generell gilt: Je heller die Farbgebung, desto schlechter der Wirkungsgrad.

Tab. 3: Veränderung der Leistung von polykristallinen Photovoltaik-Modulen aufgrund ihrer Färbung (Circa-Angaben) Quelle: (Bagda, et al., 2016, S. 80)

FARBE	MODULLEISTUNG
Gelb	146 Wp/m²
Rot	150 Wp/m²
Grün	150 Wp/m²
Grau	165 Wp/m²

Eine weitere Möglichkeit, das Aussehen von PV-Modulen zu verändern, stellt die Verwendung schwarzer oder farbiger Rückseitenfolie dar. Zudem ist es möglich, die Solarzellen rück- statt vorderseitig zu kontaktieren, sodass die Modulfläche nicht durch metallische Streifen gestört wird.
Die Schweizer Firma CSEM forscht derzeit an einer Methode, PV-Zellen in Sandsteinoptik herzustellen (siehe Tab. 4, Seite 19, letzte Zeile rechts). Die genaue Verfahrensweise und die resultierenden Wirkungsgrade sind jedoch noch nicht veröffentlicht.
Eine matte statt einer wie üblich glatten Oberfläche hat bei PV-Modulen nicht nur einen optischen, sondern auch einen technischen Einfluss. Indem der Reflektionsgrad des Lichtes verändert wird, verändert sich auch der Wirkungsgrad der PV-Zelle. Wird auf die PV-Zellen eine Antireflektionsbeschichtung aufgetragen, vermindert sich der Reflektionsgrad auf lediglich 3 %. Es leitet das einfallende Licht besser zur Zelle und erhöht dadurch den Wirkungsgrad im Vergleich zu unbeschichteten Gläsern, die einen Reflektionsgrad von 9 % aufweisen.
Durch eine Modifizierung der chemischen Absorber und des Filmaufbaus kann auch die Farbe von OPV-Modulen verändert werden. Ein Beispiel für die Farbvarianz mit einem hohen Wirkungsgrad ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abb. 4: Farben von OPV-Modulen (Heliatek GmbH) | Quelle: www.heliatek.com/de/solarfolien/technische-daten

2.3 Gebäudeintegrierte Photovoltaik

Als gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV: building integrated photovoltaics) wird eine PV-Anlage verstanden, die sich in das Fassadenbild eines Gebäudes einfügt. Die PV wird dabei selbst zum Bauteil, ersetzt Fassadenelemente und kann sogar deren Funktionen übernehmen (Würth Solar, 2012).

2.3.1 Rahmenbedingungen & Potentiale

Solarkomponenten werden in der BIPV-Fassade zum Hüllelement, welches zusätzlich regenerativen Strom erzeugt. Damit stellen sie eine architektonische Möglichkeit dar, die ab der Energieeinsparverordnung 2016 verbindlich geforderte Integration von erneuerbare Energien umzusetzen. Neubauten kommen durch die Verschärfung der Anforderungen faktisch nicht mehr ohne regenerative Energieerzeuger aus. Entweder, Bauherren installieren eine PV-Anlage und nutzen den erzeugten Strom in einer Wärmepumpe. Oder sie setzen auf eine solarthermische Anlage, um mit ihr einen Großteil der Wärmeversorgung abzudecken (Bundesverband Solarwirtschaft, 2016).
Die BIPV kann, qualitätvoll umgesetzt, einen gestalterischen Mehrwert für das Gebäude bieten: Dafür stehen bereits heute Gestaltungsmöglichkeiten in Farbe, Transparenz oder Anordnung zur Verfügung. Mit zunehmender Nachfrage wird es zukünftig auch möglich sein, die Module hinsichtlich Zuschnitt, Größe und Formgestaltung zu variieren. Dies würde eine deutliche Qualitätsverbesserung hinsichtlich architektonischer Einbindung in den Gebäudeentwurf bedeuten. Die Gestaltungsqualität stellt einen wichtigen Parameter dar, der über die allgemeine Akzeptanz entscheidet.
Neben Neubauprojekten bieten aber auch Sanierungen die Möglichkeit zur Integration von PV-Komponenten in die Fassade. Dies kann die energetische Gebäudebilanz maßgeblich verbessern. BIPV kann neben der Stromerzeugung auch in anderen Bereichen Vorteile generieren:

Witterungsschutz
Der Aufbau von PV-Modulen leistet automatisch die Funktion des Witterungsschutzes. Die Module sind regen- und winddicht, windlastfest sowie alterungsbeständig.

Einbruchsicherheit & Reststandfähigkeit
Durch den Einsatz eines entsprechenden Deck- bzw, Trägermaterials kann sowohl eine Einbruchsicherheit als auch der Widerstand gegen Durchbrechen der Elemente gewährleistet werden.

Schallschutz & -dämmung
PV-Module können je nach Aufbau Schall reflektieren oder abschwächen. Ihr Schalldämmmaß kann z. B. durch Erhöhung der Schichtdicken sowie durch asynchrone Aufbauten und spezielle Zwischenschichten verändert werden.

Sicht- & Sonnenschutz
Durch den Einsatz semitransparenter PV-Zellen kann in Gebäudebereichen mit Transparenzanforderungen ein Sicht- und Sonnenschutzeffekt erzielt und dadurch mit dem Bezug zwischen Innen und Außen entwurflich umgegangen werden. Damit erhöht sich die Gestaltungsvielfalt gegenüber rein opaken Lösungen.

Wärmedämmeigenschaften
Der oft mehrlagige Aufbau von PV-Modulen kann durch die Verwendung von isolierenden Materialien im System die Wärmedämmung der Gebäudehülle unterstützen (Odersun, 2011).

2.3.2 Lebensdauer

Die Lebensdauer von Gebäudehüllen und deren Komponenten hängt heute vor allem von der Gebäudenutzung ab, bei einem Bürogebäude beträgt sie beispielsweise etwa 60 Jahre.
Es lassen sich laut „Gebäudeintegrierte Photovoltaik - Ein Handbuch" (S. Roberts, 2009) grundlegend 3 Arten von Fassadenbauteilen unterscheiden:

1. Austauschbare Bauteile
Bauteile, die weniger lang halten als das Gebäude und deren Austausch in der Planungsphase berücksichtigt werden muss

2. Bauteile mit Wartungsbedarf
Bauteile, die mit regelmäßiger Behandlung und Wartung gleich lang halten sollen wie das Gebäude

3. Bauteile mit lebenslanger Haltbarkeit
Bauteile, die ohne Wartung die geplante Lebensdauer des Gebäudes erreichen

PV-integrierte Fassadenelemente ordnen sich in Gruppe 1 oder 2 ein: Entweder muss entsprechend das gesamte Bauteil oder Teile davon (z. B. die Deckplatte oder ein PV-Modul) ausgetauscht werden. Die Lebensdauer eines PV-Elements ist, anders als bei Fassadenbauteilen, vor allem aber abhängig von der Lebensdauer seiner Komponenten und beträgt im Durchschnitt etwa 30 Jahre. Es wird klar, dass das Thema der Revisionierbarkeit in der BIPV eine wichtige Rolle spielt. Hierfür müssen bereits in der Entwicklung und Planung Lösungen angeboten werden.

2.4 Eigenschaften & Potentiale verschiedener Fassadenmaterialien & -systeme

2.4.1 Fassadenmaterialien

Für die Errichtung von Gebäudehüllen stehen zahlreiche Baumaterialien und -weisen zur Verfügung, die je nach Anforderung von Seiten der Tragkonstruktion, der Ästhetik und/oder dem finanziellen Rahmen gewählt werden können. In Deutschland dominieren als Fassadenmaterialien im Neubaubereich verputzte Oberflächen, Metalle, Beton und Ziegel, jedoch gibt es auch zahlreiche weitere Materialien, die in der Fassadenoberfläche eingesetzt werden (vgl. Abb. 5). Um die Potentiale der unterschiedlichen Fassadenmaterialien für die Integration bzw. Kombination mit PV-Komponenten abschätzen zu können, wurden die wichtigsten Materialien und ihre Eigenschaften zusammengestellt.

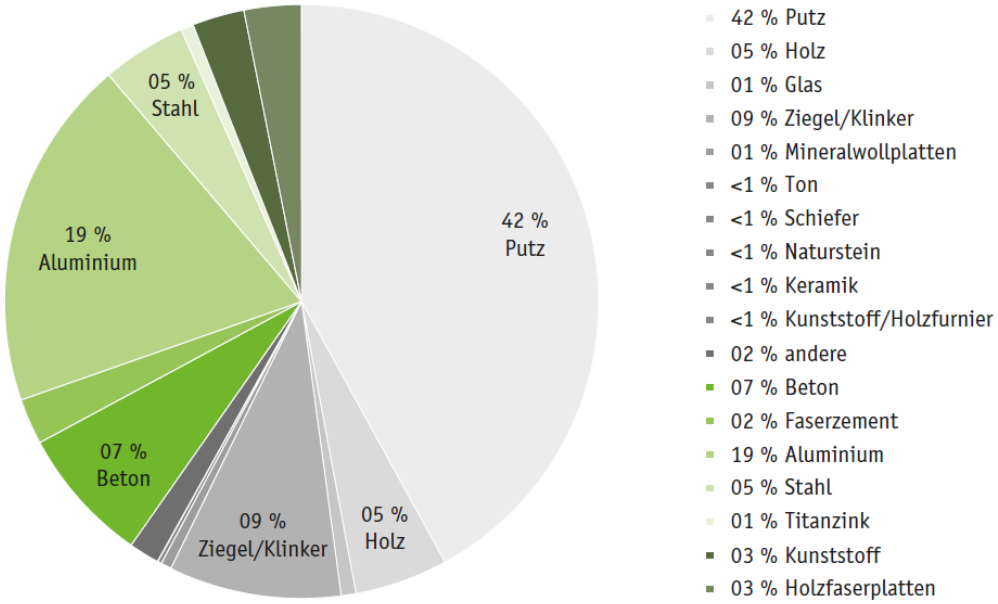


Abb. 5: Verbaute Fassadenmaterialien am dt. Markt (Neubau) | Quelle: BauInfoConsult GmbH, Fassadenmonitor 2012

Putze

Putz besteht aus sog. Putzmörtel und kann auf nahezu jede Oberfläche wie Betonflächen, Mauerwerk oder Wärmedämmung aufgebracht werden. Dabei gibt es hinsichtlich der Formgestaltung des Untergrundes kaum Einschränkungen. Putz besteht i. d. R. aus einem mehrschichtigen Aufbau aus Putzträger, Putzgrund und einem Oberputz. Außenputze bilden den Schutz des Rohbaus gegen Witterungseinflüsse und dienen darüber hinaus auch als Gestaltungselement. Sie übernehmen dabei verschiedene Aufgaben wie bspw.:

- Witterungsschutz
- Erscheinungsbild
- Ausgleich von Unebenheiten
- Unterstützung der Wärmedämmung
- Verbesserung des Brand- und Schallschutzes

Der Putz wird direkt auf die tragende Außenwand angebracht. Durch die Anbringung von Putzschienen werden die Putzschichtdicken und die Geradlinigkeit der Putzränder sichergestellt. Der Putz wird mit einer Spritzbewurftechnik auf die Außenwand aufgetragen und anschließend mit einem Reibebrett glatt gerieben.

Metalle

Neben Stahl und Aluminium wird in Fassadenkonstruktionen auch Kupfer, Zink oder Messing eingesetzt. Metalle werden meist als Legierungen verarbeitet, da diese über bessere Werkstoffeigenschaften verfügen als Reinmetalle. Bei der Planung sind besonders der Korrosionsschutz und temperaturbedingte Längenänderungen zu beachten. Bleche werden in Fassaden als vorgehängte, hinterlüftete Beklei-

dung sowie in Sandwichpaneelen eingesetzt. Sie sind sehr gut formbar und zeichnen sich durch ihre Beständigkeit und Langlebigkeit aus. Unter Einfluss der Atmosphäre bilden einige Metalle eine Oxidschicht, die sich im Laufe der Zeit farblich und stofflich verändert. Oberfläche und Farbe können in unterschiedlicher Weise vorbehandelt werden, um den natürlichen Korrosionsprozess vorwegzunehmen. Im Fassadenbereich werden v. a. folgende Metalle eingesetzt:

- *Stahl* | aus weißem Roheisen unter Zusatz von Legierungselementen und/oder Schrott; muss vor Korrosion geschützt werden (Feuer-/Legierverzinkung oder Kunststoffbeschichtung)
- *Edelstahl* | enthält rund 12 % Chrom, z. T. Nickel bzw. Molybdän; kann ohne weitere Beschichtungen im Freien eingesetzt werden; Oberflächenbearbeitung durch Schleifen, Glasstrahlen, Ätzen und Emaillieren möglich
- *Cortenstahl* | wetterfester (durch die Bildung einer Oxidschicht), schweißbarer Feinkornbaustahl
- *Aluminium* | als Reinaluminium oder als Legierung verwendet; in Fassaden meist eloxiert bzw. beschichtet eingesetzt, um sie vor mechanischen und Umwelteinflüssen zu schützen
- *Kupfer* | der glänzend hellrote Baustoff bildet mit der Zeit eine typisch grünliche Patina aus
- *Zink* | die zunächst blanke Oberfläche wird durch den natürlichen Bewitterungsprozess mit einer matten, grau-blauen Patina überzogen
- *Messing* | Legierung aus Kupfer und Zink; aus dem rotgoldenen Farbton entwickelt sich ein grünbrauner Farbton, später eine endgültige dunkelbraun-anthrazitfarbene Oberfläche

Anwendung finden Metalle meist in Form von:

- Tafeln oder Kassetten
- Trapez-, Well- und Zickzackprofilblechen
- Aluminiumverbundplatten
- Sandwichelementen
- Schindeln
- Lochblechen, Streckgittern & Geweben
- metallischen Beschichtungen

Metallfassaden werden zumeist als vorgehängte, hinterlüftete Bekleidung oder als Sandwichpaneel realisiert. Bei vorgehängten hinterlüfteten Systemen werden an der tragenden Wand punktuelle Anker befestigt, an denen eine Horizontal- und/oder Vertikallattung angebracht wird. An diese können die Fassadenelemente entweder angeschraubt, angenietet, angeklebt oder eingehängt werden. Aluminiumverbundplatten werden oftmals mit einem Bolzen-Einhangsystem an die Wand gehängt. Sandwichelemente werden zumeist auf einem Stahlständertragwerk nicht sichtbar angeschraubt.

Beton

Dieser Werkstoff besteht aus Bindemitteln, Gesteinskörnungen und Wasser sowie Betonzusätzen. Seine geringe Biegezugfestigkeit nach dem Abbinden kann durch eine Bewehrung aus Stahl oder Textil bedeutend erhöht werden. Zudem spielt die richtige Betondeckung eine entscheidende Rolle für die Dauerhaftigkeit, vor allem bei Stahlbetonfassaden. Da Beton in eine Schalung gefüllt wird, kann eine breite Formenvielfalt realisiert werden, der nur Grenzen von Seiten des Schalungsbaus und der Bewehrung gesetzt sind. Durch eine Schalung von besonderer Oberflächenbeschaffenheit (z. B. saugend/ nicht saugend, Tafeln, Bretter) und einer abgestimmten Betonmischung werden Oberflächenqualität und –aussehen grundlegend festgelegt. Der Beton kann nach dem Aushärten zusätzlich gestrahlt, geschliffen oder poliert werden. In Fassaden wird Beton in folgenden Formen eingesetzt:

- Elemente aus *Ortbeton*, die auf der Baustelle in die Schalung verfüllt und ausgehärtet werden
- Im Werk gefertigte *Betonfertigteile*, die auf der Baustelle montiert und ggf. komplettiert werden
- Im Werk gefertigte *Betonsandwichelemente* aus Beton-Innenschale, Dämmebene und Vorsatzschale, welche meist geschosshoch und mit Einbauteilen versehen sind

Beton-Fassadenplatten werden meist als vorgehängte hinterlüftete Fassade an einer tragenden Unterkonstruktion angebracht und mittels Fassadenplattenankersystem aus nichtrostendem Stahl am Bauwerk punktuell befestigt. Eine andere Variante ist die Anbringung einer vertikalen Lattung an punktuellen Wandankern, an der ein horizontales Agraffensystem befestigt ist. An der Betonplatte ist das Gegenstück zur Agraffe durch Klebung oder Einbetonage befestigt, sodass die Platten einfach in die Agraffen eingehängt werden können.

Faserzement

Der Verbundwerkstoff besteht zu überwiegenden Teilen aus Portlandzement (ca. 40 %) sowie aus Kalksteinmehl, zermahlenem Faserzementmaterial und Wasser. Als Armierungsfasern werden Chemiefasern oder Prozessfasern (Zellstoff) verwendet. Mikroskopisch kleine Luftporen in den Tafeln machen das Material frostbeständig, es ist wasserdicht, UV-beständig, fäulnissicher und nicht brennbar. Für Anwendungen in der Fassade werden die hochverdichteten Faserzementtafeln in Materialdicken von 5 - 20 mm eingesetzt, wobei die körnigen oder glatten Oberflächen matt lasiert, deckend farbbeschichtet, heißverfilmt oder durchgefärbt hergestellt werden.

Faserzementplatten werden entweder wie Betonplatten nicht sichtbar an den tragenden Außenwänden befestigt oder sichtbar an einer Unterkonstruktion angeschraubt.

Ziegel

Mauerziegel bestehen aus Ton, Lehm oder Ton enthaltenden Massen mit und ohne Zuschlagstoffe. Für die Herabsetzung der Rohdichte werden ggf. Sägemehl oder Polystyrolkügelchen eingemischt, welche beim Brennvorgang rückstandslos verbrennen, wodurch sich Poren bilden. Auf der Außenseite der Gebäudehülle werden Ziegel in Form von Sichtmauerwerk oder Verblendung eingesetzt, dafür kommen folgende Ausführungen in Frage:

- *Klinker* | Bis zur Sinterung gebrannte Ziegel mit einer Rohdichte über 1,90 kg/dm³ und einer Druckfestigkeit über 28 N/mm²
- *Verblendmauerwerkziegel* | Mauerziegel, die für den Einsatz als Sichtmauerwerk frostbeständig sind.

Trotz vorgegebener Standardformate und -größen der Ziegel lassen sich Rundungen und sogar Freiformen realisieren, auch Sonderformen, -farben und -formate sind möglich.

Klinkerriemchen können einfach auf ein Wärmedämm-Verbundsystem aufgeklebt werden. Die Fugen werden anschließend verfüllt. Verblendmauerwerkziegel werden mit Konsolenankern an der tragenden Außenwand befestigt. Konsolenschienen zur Befestigung werden entweder schon mit in die tragende Betonwand einbetoniert oder nachträglich angeschraubt. In die Schiene wird der Konsolenanker eingehängt, welcher die Dämmschicht durchdringt. Das aus der Dämmung herausschauende vordere Schwert der Konsole wird mit eingemauert, sodass die Lasten abgetragen werden können.

Naturstein

Es existiert eine enorme Bandbreite an Natursteinen, die in vielfältiger Form in Fassaden eingesetzt werden können. Grundsätzlich werden Natursteine in drei Gesteinsarten unterteilt:

- Magmatische Gesteine, z. B. Granit
- Sedimentgesteine, z. B. Sand- oder Kalkstein
- Umwandlungsgesteine, z. B. Marmor

Aufgrund von Langlebigkeit, Farbenvielfalt, Mustern und Strukturen ist das Material als Fassadenbekleidung sehr beliebt. Zudem besteht die Möglichkeit der Oberflächenbearbeitung durch z. B.:

- Schleifen oder Polieren
- Spitzen oder Scharrieren
- Sandstrahlen oder Beflammen

Natursteinfassaden sind meist vorgehängte, hinterlüftete Fassaden und bestehen aus Einzelplatten, die an den Ankern durch Dorne oder Hinterschnittanker gehalten werden.

Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffplatten eignen sich aufgrund der flächigen Gestaltungsmöglichkeit und der schnellen Montage gut für den Einsatz an Fassaden, insbesondere für hinterlüftete Holzfassaden. Die für eine Außenanwendung sinnvoll einsetzbaren Werkstoffe sind:

- *Dreischicht-Platten aus Vollholz* | kreuzweise verleimte Brettlagen mit geringen Quell- und Schwindeigenschaften; Baustoffklasse B2; unbehandelt einsetzbar
- *Bau-Furniersperrholz-Platten* | kreuzweise verleimte Schälfurniere mit geringen Quell- und Schwindeigenschaften; Baustoffklasse B2; nur oberflächenbehandelt einsetzbar
- *Zementgebundene Spanplatten* | bestehend aus Holzspänen und Portlandzement; Baustoffklasse B1 bzw. A2 bei Zumischung von Perliten; feuchte- und schädlingsresistent.

Die vorgehängten, hinterlüfteten Holzplatten werden zumeist an eine Unterkonstruktion, bestehend aus Horizontal- und Vertikallatten, angeschraubt. Punktuelle Wandhalterungen aus Aluminium, Edelstahl oder Hartkunststoff werden an die tragende Außenwand angeschraubt und durchdringen die Dämmschicht. Die vertikalen Holzlatten werden an der Spitze der Wandhalter befestigt.

Hochdrucklaminatplatten (HPL)

HPL-Platten bestehen aus Cellulose und Phenol- bzw. Melaminharz und werden mithilfe von Druck und Wärme gefertigt. Ihre Oberfläche kann digital gestaltet, bedruckt oder flächig eingefärbt werden. Somit lassen sich auch individualisierte Platten realisieren. HPL verfügen über eine harte, bruch- und schlagfeste Oberfläche, eine hohe Biegesteifigkeit, eine gute Witterungsbeständigkeit und sind langlebig.

HPL-Platten werden zumeist als vorgehängte, hinterlüftete Fassade angebracht. Die Platten werden entweder sichtbar durch Schrauben bzw. Nieten oder unsichtbar durch Hinterschnittanker bzw. rückseitig befestigte Konsolen an der Unterkonstruktion befestigt. Punktuelle Wandhalterungen aus Aluminium, Edelstahl oder Hartkunststoff werden an die tragende Außenwand angeschraubt und durchdringen die Dämmschicht. An der Spitze der Wandhalter wird die Unterkonstruktion, zumeist bestehend aus Aluminiumprofilen, befestigt.

Keramik

Keramische Fassadenwerkstoffe bestehen aus tonmineralhaltigen Stoffen wie Feldspat, Schamott oder Ton und Wasser, die bei etwa 1.200 °C gebrannt werden und eine niedrige Wasseraufnahme von unter 3 % aufweisen. Damit sind die Materialien sehr dicht und frostbeständig. In Fassaden wird Keramik als Grobkeramik (Ziegelplatten u. a.) und als Feinkeramik (Steinzeugfliesen) eingesetzt. Das Material gilt als nicht brennbar. Die Plattenabmessungen variieren in der Länge von 60 - 150 cm, bei den Plattenhöhen von 15 - 50 cm, in den Dicken von 3 - 3,5 cm.

Keramische Bekleidungen in Fassaden werden in der Regel in vorgehängten, hinterlüfteten Konstruktionen ausgeführt, können aber auch in einer einschaligen Konstruktion angebracht werden. Als vorgehängte, hinterlüftete Variante werden die Ziegelplatten zumeist auf einer Holz- bzw. Aluminiumunterkonstruktionen unsichtbar befestigt. Punktuelle Wandhalterungen aus Aluminium, Edelstahl oder Hartkunststoff werden an die tragende Außenwand angeschraubt und durchdringen die Dämmschicht. An der Spitze der Wandhalter wird die Unterkonstruktion angebracht.

Kunststoffe

Im Baubereich spielen v. a. synthetische Kunststoffe eine bedeutende Rolle. Diese eignen sich aufgrund ihrer geringen Wasseraufnahme, der guten Wärmedämmung und ihrer teilweise großen Zähigkeit und Transparenz gut für den Einsatz in Gebäudehüllen. Da es sich um organische Baustoffe handelt, sind sie jedoch fast ausnahmslos brennbar bzw. zersetzen sich bei hohen Temperaturen. Hauptsächlich werden folgende transluzente bis transparente Kunststoffe eingesetzt:

- *Acrylglas (PMMA)* | z. B. in Form von Platten, Well- und Stegplatten; in den Standard-Plattendicken von 2 - 25 mm erhältlich; kann durch Umwelteinflüsse brüchig werden und sich u. U. verfärben; kratzempfindlich; hoher Wärmeausdehnungskoeffizient
- *Polycarbonat (PC)* | z. B. in Form von transparenten, ebenen Platten, extrudierten Steg- und Wellplatten erhältlich; sehr schlagzäh und kältebeständig; hohe Transparenz; relativ hohe Wärmeformbeständigkeit und geringe Wasseraufnahme
- *Polyethylenterephthalat (PET-A)* | z. B. in Form von Platten erhältlich; sehr schlagzäh; chemikalienbeständig
- *Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)* | In Fassaden vor allem als pneumatisch vorgespannte Membrankonstruktionen in Form von transparenten, mehrschichtigen Ausfachungselementen eingesetzt; zusätzlich die Oberflächen lassen sich durch Bedruckung, Lackierung oder Metallbedampfung veredeln und mit Beschichtungen ausrüsten

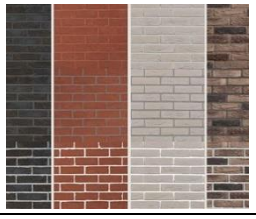
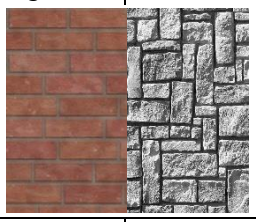
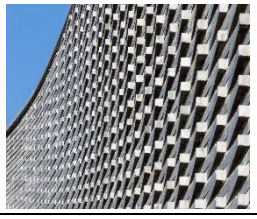
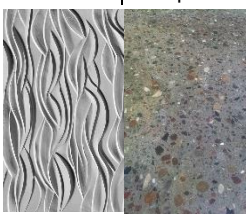
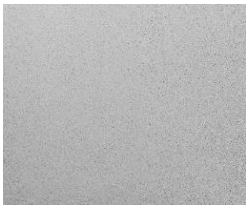
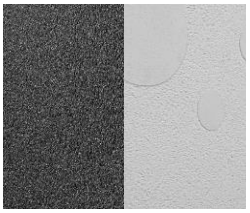
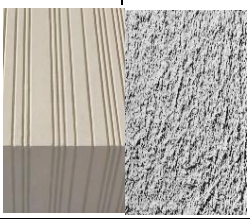
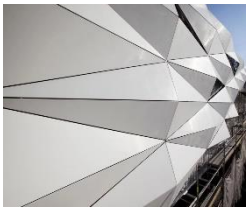
  Quelle: (BauNetz Media GmbH, 2016)

Kunststoffe können auf ganz unterschiedliche Art und Weise an die Fassade angebracht werden. Da sie oftmals transluzent sind, werden sie oft wie Gläser in einer Pfosten-Riegel-Fassade integriert. Jedoch besteht auch die Möglichkeit, die Platten als vorgehängte hinterlüftete Fassade sichtbar an eine Unterkonstruktion anzuschrauben oder anzunieten. Bei einer nicht sichtbaren Befestigungsvariante werden rückseitige Ankersysteme an die Platten angeklebt und diese in eine Unterkonstruktion eingehängt. Punktuelle Wandhalterungen aus Aluminium, Edelstahl oder Hartkunststoff werden an die tragende Außenwand angeschraubt und durchdringen die Dämmschicht. An der Spitze der Wandhalter wird die Unterkonstruktion angebracht.

2.4.2 Oberflächenbeschaffenheit von Fassadenmaterialien

Bei der Integration von PV-Modulen in die Fassade sollte darauf geachtet werden, Fassadenmaterialien und PV-Zellen optisch aufeinander abzustimmen. Für die Kombination der Fassadenmaterialen mit den Photovoltaik-Modulen können diese mit unterschiedlichen Methoden in ihren optischen Oberflächeneigenschaften verändert werden, sodass sich eine Kombination farblich angleicht - oder auch bewusst kontrastiert. Der optischen Veränderbarkeit der Fassadenmaterialien sind kaum Grenzen gesetzt. Dabei lassen sich sowohl die Fassadenmaterialien, als auch die Photovoltaik-Module optisch verändern, um den ästhetischen Ansprüchen des Architekten gerecht zu werden. Die folgende Tabelle zeigt auszugsweise unterschiedliche Veränderungsbeispiele von Fassadenmaterialien.

Tab. 4: Oberflächenvarianz ausgewählter Fassadenmaterialien

	Erscheinungsbeispiel	Farbigkeit	Oberflächenstruktur	Fassadenbeispiel
Holz	horizontale Lattung	verwittert | lasiert	geschliffen | 3D-Struktur	gebogen
Natur-stein	großformatige Platten	natürliche Farbvarianzen	gebeilt	trianguliert
Ziegel	Mauerwerksverband	Ziegel- & Fugenfarbe 	glatt | strukturiert 	herausgedreht 
Beton	glatt geschalt	durchgefärbt	Struktur-matrize | geschliffen & poliert 	3D-Struktur
Putz	fein gekörnt 	durch-gefärbt | grafisch 	gerillt | rau 	Freiformen
Metall	gebürstet	farbig beschichtet	wölbstrukturiert	gefaltet 

Methoden zur optischen Veränderung von Fassadenoberflächen

Die Methoden zur Veränderung der Oberflächen von Fassadenmaterialien sind vielfältig. Auszugsweise sollen hier einige vorgestellt werden.

Holz

Die Holzfassadenfarbe und -struktur kann sowohl durch die Holzart als auch die Verarbeitung maßgeblich gestaltet werden. Durch das Aufbringen von Lasuren kann das Holz gefärbt und vor Verwitterung geschützt werden, wobei die Maserung des Holzes sichtbar bleibt.

Naturstein

Natursteinoberflächen könnten in ihrer Farbigkeit und Struktur von Hause aus kaum unterschiedlicher sein. Die Wahl des Steines bestimmt die spätere Fassadenfarbe. Die Oberflächenstruktur der Natursteinfassade kann durch Schneide- und Schleifverfahren beeinflusst werden.

Ziegel

Das Erscheinungsbild von Ziegeln ist durch das Ziegelformat, die Materialfarbe sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Steine bestimmt. Dabei hängt die Farbe des Ziegels vom Ton-Sandverhältnis sowie den enthaltenen Mineralien im Ton ab. Je höher der Eisengehalt, desto roter ist die Färbung. Durch das Aufbringen von Engoben und Glasuren vor dem Brennen können zudem verschiedenste Farb- und Glanzgrade hergestellt werden.

Beton

Eine Methode zur Veränderung der Optik von Beton ist seine Durchfärbung mit Pigmenten. Zur Erzeugung einer rauen und matten Oberfläche wird der Beton sandgestrahlt oder abgesäuert. Zur Herstellung einer glatten Oberfläche kann der Beton geschliffen und poliert werden. Zudem können verschiedenste Oberflächenstrukturen durch Silikonmatrizen, welche in die Schalung eingelegt werden, erzeugt werden.

Putz

Eine Putzoberfläche kann fugenlos mit unterschiedlichsten Strukturen und Färbungen in jeglichen Farben und Strukturen realisiert werden.

Metall

Metallfassaden sind in nahezu jeder Farbe mit unterschiedlichen Reflektionsgraden und Mustern erhältlich.

Reflektionseigenschaften von Fassadenmaterialien

Der Reflektionsgrad der verwendeten Fassadenmaterialien sowohl der zu planenden Fassade als auch der gegenüberliegenden Fassaden ist unter anderem entscheidend für die solaren Einstrahlwerte auf die PV-Module. Werden Oberflächen mit hohen Reflektionsgraden verwendet, kann durch geschickte Lichtlenkung die Einstrahlmenge auf die PV-Module erhöht werden. Jedoch ist stets zu beachten, dass bei hohen Reflektionsgraden der Fassadenbekleidung eine ungewollte Blendung der Passanten oder Bewohner der gegenüberliegenden Gebäude verursacht werden kann. Zudem ist der Reflektionsgrad der Materialien

entscheidend für die Aufheiztemperatur der Fassade. Dies wiederum hat Auswirkungen auf das Ausdehnungsverhalten der Materialien.

2.4.3 Fassadenarten

Über die Fassadenmaterialien hinaus nimmt auch die Fassadenart Einfluss auf die Gestaltung der BIPV-Fassade. Bedingt durch die Wahl des Systems ergeben sich unterschiedliche Varianten der Fassadenausbildung: Diese kann einschalig, mehrschalig, hinterlüftet oder nicht hinterlüftet ausgeführt werden. Für die Evaluierung der Integrationsmöglichkeiten der optimierten PV wurden die gängigsten Fassadenarten betrachtet. Gebäudehüllen lassen sich konstruktiv in drei Gruppen unterteilen:

- Tragende Außenwände: z. B. Massiv- oder Leichtbaukonstruktionen
- Selbsttragende Außenwände: z. B. Sandwichkonstruktionen
- Nichttragende Außenwände: z. B. Pfosten-Riegel- oder Vorhangfassaden

TRAGENDE FASSADEN sind Teil des Gebäudetragwerks und nehmen nicht nur äußere Lasten wie Winddruck und -sog auf, sondern tragen auch Eigen- und Nutzlasten ab. Dafür müssen sie statisch entsprechend ausgelegt sein. Das Fassadenraster ist direkt abhängig vom Konstruktionsraster.
SELBSTTRAGENDE FASSADEN tragen die eigenen Lasten über die gesamte Höhe ab und leiten diese nicht ins Bauwerk ein. So kann die Tragkonstruktion des Gebäudes geringer ausfallen. Das Fassadenraster kann unabhängig vom Konstruktionsraster entwickelt werden.
NICHTTRAGENDE FASSADEN nehmen äußere Lasten auf und geben diese zusammen mit ihren Eigenlasten an das Tragwerk des Gebäudes weiter. Das Fassadenraster kann dabei unabhängig vom Konstruktionsraster gestaltet sein.

Entsprechend den Anforderungen an eine Fassade steht dem Planer eine Reihe von Fassadenarten zur Verfügung:

Monolithische Fassaden
Die statischen und bauphysikalischen Eigenschaften einschichtiger (monolithischer) Außenwände werden nur durch ihr Material und dessen Dicke bestimmt. Das Material der Wand muss daher zahlreichen Anforderungen gerecht werden. Eine monolithische Hülle aus vorwiegend nur einem Material kann die gestiegenen Anforderungen des Wärmeschutzes heute jedoch kaum mehr erfüllen. In den letzten Jahren wurden die Dämmeigenschaften unterschiedlicher Baustoffe deshalb erhöht (Dämmbetone, Dämmziegel) (Herzog, Krippner, & Lang, 2004). Gegenüber anderen Fassadenarten ist bei diesen allerdings ein stärkerer Wandquerschnitt nötig, um statische und thermische Anforderungen erfüllen zu können.

<u>Vorteile für die PV-Integration</u>
- starker Wandquerschnitt ermöglicht das Formen der außenseitigen Oberfläche
- Aufnahme notwendiger elektrischer/dickerer Bauteile möglich

<u>Nachteile für die PV-Integration</u>
- Sonderlösungen für Revisionierbarkeit benötigt (PV-Zellen, Kabel etc.)

- bei integrierten PV-Elementen könnte es durch die fehlende Hinterlüftung zu Wärmestau bzw. Feuchteansammlungen kommen

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)
WDVS sind mehrschichtige, nicht hinterlüftete Systeme zur Dämmung und Witterungsschutz von Gebäudeaußenwänden, bestehend aus folgenden Schichten:

- Befestigung auf der tragenden Wand
- Wärmedämmung
- Armierungsschicht
- Außenputz

Diese werden üblicherweise an massiven Wandkonstruktionen oder auf Trägerplatten an Leichtbaukonstruktionen angebracht. Als Wärmedämmstoff werden i. d. R. Hartschaumplatten (EPS oder XPS), Mineralfaserplatten und Kork- bzw. Holzfaserplatten eingesetzt, die durch Verklebung oder Dübelung am Untergrund fixiert werden (BauNetz Media GmbH, 2016). Durch die steigenden Anforderungen an den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz werden immer dickere Dämmstofflagen eingesetzt, im Neubau liegen die Dicken je nach Anforderung bei bis zu 20 cm, in der Sanierung bei ca. 14 cm (Pech, Pommer, & Zeininger, 2014).

Vorteile für die PV-Integration
- durch den Einsatz von Hartdämmstoffen kann eine individuelle Formgebung z. B. durch Fräsen oder 3D-Cutten realisiert werden
- auf nahezu jeder Oberfläche einsetzbar

Nachteile für die PV-Integration
- bei integrierten PV-Elementen könnte es durch die fehlende Hinterlüftung zu Wärmestau bzw. Feuchteansammlungen kommen
- Revisionierung und Leitungsführung schwieriger umzusetzen als bei hinterlüfteten Fassaden
- Verfärbungen/Algen-/Pilzbewuchs sind typische Problematiken bei WDVS

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF)
Der Aufbau dieser Fassaden besteht üblicherweise aus einer Außenhaut, einer dahinterliegenden Luftschicht, einer Dämmebene und der Tragstruktur. Die Außenhaut kann aus verschiedenen Materialien wie beispielsweise HPL-Platten, Metallbleche, Faserzementplatten etc. ausgeführt werden (BauNetz Media GmbH, 2016). Bei der Montage wird auf einer Unterkonstruktion aus Holz oder Metallprofilen die Wandbekleidung aufmontiert. In den letzten Jahren wurden spezielle Befestigungsmittel entwickelt, die eine verdeckte Befestigung der Wandbekleidungen ermöglichen, dazu zählen Hinterschnittanker und verdeckte Schienensysteme (Pech, Pommer, & Zeininger, 2014). Die Außenhaut übernimmt die Funktion des Wetterschutzes und der architektonischen Gestaltung, die Luftschicht zwischen der Außenhaut und der tragenden Wand (beziehungsweise der aufgebrachten Dämmschicht) gewährleistet die Hinterlüftung des Systems (S. Roberts, 2009).

Vorteile für die PV-Integration
- Formgestaltung der Außenhaut kann nahezu unabhängig von der thermischen Hülle ausgebildet werden
- keine Wärmebrücken-/Feuchte-Problematik
- keine Einwirkung von Lasten aus dem Gebäude
- Luftschicht kann zur Leitungsführung und Unterbringung von notwendiger Hardware (Bypassdioden, Hochsetzsteller) herangezogen werden
- Fassadenbekleidung kann je nach Ausführung einzeln ausgetauscht/revisioniert werden

Nachteile für die PV-Integration
- grundlegend keine systemspezifischen Nachteile
- Eigenschaften prinzipiell abhängig vom gewählten Material der vorgehängten Fassade

Verblendungen

Aufgrund der steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz ist es heute kaum mehr möglich, tragende Außenwände aus nur noch einem Massivbaustoff herzustellen. Üblicherweise werden die Funktionen „Äußeres Erscheinungsbild/Wetterschutz", „Dämmen" und „Tragen" voneinander getrennt. Daher wird die Außenwand eines Gebäudes oft verblendet, was hinterlüftet oder nicht hinterlüftet ausgeführt werden kann. Materialien wie Klinker, Naturstein oder Betonwerksteine werden z. B. mithilfe von Verbindungselementen wie Draht- oder Konsolanker mit der Tragschale verbunden.

Vorteile für die PV-Integration
- Formgestaltung der Außenhaut kann nahezu unabhängig von der thermischen Hülle erfolgen
- Keine Wärmebrücken-/Feuchteproblematik
- Keine Einwirkung von Lasten aus dem Gebäude
- Luftschicht kann zur Leitungsführung und Unterbringung von notwendiger Hardware herangezogen werden

Nachteile für die PV-Integration
- Eigenschaften abhängig vom gewählten Material und Format der Bekleidungswerkstoffe
- Grundlegende Problematik der Revisionierbarkeit aufgrund der durch Mörtel oder Klebung oft fest verbundenen Bekleidungswerkstoffe

Sandwichelement-Fassaden

Sandwichelemente sind konstruktive Systeme aus stoffschlüssig gekoppelten zug- und druckfesten Deckschichten und einem schubsteifen Dämmkern, welche eine große Biegesteifigkeit aufweisen.
Diese können je nach Anforderung tragend, selbsttragend und nichttragend ausgeführt werden. Dabei unterscheidet man je nach Flächengewicht der Wandelemente in:

- *Schwere Sandwich-Konstruktionen* | > 300 kg/m^2, meist als tragende Konstruktion ausgebildet, Wetterschale und Tragschale sind zusätzlich durch Trag- und Halteanker verbunden

- *Mittelschwere Sandwich-Konstruktionen* | 150 - 300 kg/m², meist als tragende Konstruktion ausgebildet, Wetterschale und Tragschale sind zusätzlich durch Trag- und Halteanker verbunden
- *Leichte Sandwichelemente* | < 150 kg/m², meist als selbsttragende Konstruktion ausgebildet, i. d. R. dünne profilierte Blechschalen mit dazwischen liegender Hartdämmung, die Montage der Platten erfolgt verdeckt im Bereich der Stöße oder sichtbar auf einer Unterkonstruktion

Durch die Verwendung von glas- und carbonfaserverstärkten Kunststoffen und Betonen für die Deckschalen und Hochleistungsdämmung als Kernschicht ist es zudem möglich, ultraleichte Wandpaneele zu erzeugen (Pech, Pommer, & Zeininger, 2014).

Vorteile für die PV-Integration
- Werksfertigung ermöglicht Qualitätssicherung
- Einbauteile können werksseitig bereits vorgesehen werden
- Können abhängig vom eingesetzten Material gekrümmt oder gefaltet hergestellt werden
- Bis zu einem gewissen Grad besteht auch die Möglichkeit, die äußere Deckschicht unabhängig von der hinteren (Trag)Schicht zu formen

Nachteile für die PV-Integration
- Durch die fehlende Hinterlüftung kann es zu Wärmestau oder Feuchteansammlung kommen

Vorhangfassaden

Vorhangfassaden sind nichttragende Gebäudehüllen, die am Primärsystem befestigt werden. Die Lasteintragung von Eigen- und Windlast erfolgt überwiegend punktförmig, wobei das Anbringen der Lastabtragungspunkte auf bzw. vor der Geschossdecke ermöglicht das höchste Maß an Flexibilität, sodass die Unabhängigkeit vom Stützenraster gegeben ist. Nicht zu verwechseln ist die Vorhangfassade mit einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade. Vorhangfassaden können z. B. in Pfosten-Riegel-Bauweise, als Element- oder Seilfassade ausgeführt werden (Gockell, 1964).

Vorteile für die PV-Integration
- nichttragende Fassaden, keine Einwirkung von Lasten aus dem Gebäude
- Fassadenraster unabhängig vom Konstruktionsraster des Gebäudes
- Pfosten-Riegel- und Elementfassaden können durch 3D-Ausfachungen (Rohrrahmen o. ä.) für die PV-Integration optimiert werden
- Profile und Rahmen der Systeme können für Verschaltung und Leitungsführung herangezogen werden
- In Pfosten-Riegel-Systemen sind die Anschluss- und Fugenlösungen bereits integriert, sodass lediglich die Ausfachungen entwickelt werden müssen
- Elementfassaden werden komplett im Werk gefertigt, wodurch die Bauteile in hoher Qualität gefertigt und bereits funktionsgeprüft werden können

Nachteile für die PV-Integration
- Pfosten-Riegel-Fassaden sind standardisierte Fassaden, die eine individuelle Gestaltung nur in den Ausfachungen ermöglichen, Vor- und Rücksprünge bzw. Wölbungen mit dem gesamten Fassadensystem sind kaum umsetzbar

Membranfassaden

Moderne Membranfassaden sind dünnhäutige, vorgespannte Konstruktionen. Die mechanisch oder pneumatisch vorgespannten Materialien können Belastungen aus Winddruck und -sog in die Primärkonstruktion abtragen. Neben textilen Membranen werden auch Kunststofffolien in Membrankonstruktionen eingesetzt (BauNetz Media GmbH, 2016).

Vorteile für die PV-Integration

- geeignete PV-Komponenten könnten in jeder gewünschten Form in textile Membranen eingewebt, aufgeklebt, aufgedruckt od. laminiert werden und so Flächen, Muster, Schriftzüge od. Bilder erzeugen
- nichttragende Fassaden, keine Einwirkung von Lasten aus dem Gebäude

Nachteile für die PV-Integration

- durch Vorspannung und/oder Krümmung der Konstruktionen muss stets individuell geklärt werden, inwieweit/ in welchen Bereichen die Integration von PV in der Fassade realisiert werden kann
- eingeschränkte Einsetzbarkeit von PV-Technologien

2.4.4 Kombinationspotentiale

Nachdem die beschriebenen Fassadenarten und -materialien zunächst einzeln bezüglich ihrer Eigenschaften für optimierte BIPV betrachtet wurden, wurden sie schließlich zusammengeführt und ihre Kombination hinsichtlich der Eignung für BIPV-Fassaden bewertet (siehe Tab. 5). Die Wertung basiert auf den ermittelten Eigenschaften in Punkt 2.4.1 bis 2.4.3.

Tab. 5: Kombinationspotentiale von Fassadenarten & -materialien mit PV-Elementen

		FASSADENARTEN						
		Monolithische Fassade	WDVS	Vorgehängte hinterlüftete Fassade	Verblendung & Verblendschale	Sandwichele-ment-Fassade	Vorhangfassade	Membran-fassade
FASSADENMATERIALIEN	Putz	-	+	x	x	x	x	x
	Metall	x	x	+	+	+	+	x
	Beton	o	x	+	+	+	+	x
	Faserzement	x	x	+	+	-	-	x
	Ziegel	o	x	x	+	x	x	x
	Naturstein	-	x	-	-	x	x	x
	Holzwerkstoffe	-	x	+	+	+	+	x
	HPL	x	x	+	+	+	+	x
	Keramik	x	x	o	o	x	x	x
	Kunststoff	x	x	+	+	+	+	+

+ … hohes Potential | o … mittleres Potential | - … geringes Potential | x … systemspezifisch nicht möglich

Prinzipiell besitzen Metalle, Beton, Kunst- und Holzwerkstoffe in unterschiedlichen Fassadentypen ein hohes Potential für die Kombination mit PV-Elementen. Dies sind im Speziellen: vorgehängte hinterlüftete Fassaden, Sandwich-Fassaden, Verblendungen und Vorhangfassaden. Putze und Ziegel bieten ein kleineres Einsatzspektrum für die BIPV, decken aber insgesamt einen hohen Fassadenmarktanteil ab. Dabei sind die Kombinationen Putz und WDVS bzw. Ziegel als Verblendschale gängige Fassadensysteme. Die mit mittlerem und geringem Potential eingestuften Kombinationen sind prinzipiell denkbar mit PV, jedoch technologisch höchstwahrscheinlich schwieriger umzusetzen und in der Nutzung bezüglich Wartung und Revisionierung ggf. problematischer.

2.5 Ökonomische & ökologische Kriterien

2.5.1 Ökonomische Kriterien

Die Integration von PV-Komponenten in die Fassade bedeutet zunächst einen Mehraufwand, der sich in den Erstellungs- und Unterhaltungskosten eines Gebäudes wiederspiegelt. Es entstehen Mehrkosten für:

- Aufwendigere Planung
- Zusätzliche Komponenten: elektronische Zusatzkomponenten & statische Verstärkung der Unterkonstruktion
- Errichtung: kompliziertere Anbringung, nur mit geschultem Personal und Elektriker möglich
- Wartung/Revision: Monitoring, Berichtswesen, Störfallmanagement, Wiederkehrende Prüfungen

Die bauteilintegrierte PV kann trotz höherer Initialkosten deutlich wirtschaftlicher als andere Baumaterialien sein. Die Wirtschaftlichkeit von BIPV-Anlagen ergibt sich aus den Stromerträgen, welche entweder selbst genutzt werden oder eingespeist und vergütet werden können. Außerdem kann ein geldwerter Vorteil bei der Errichtung von BIPV-Anlagen durch die Senkung des Primärenergiebedarfes, welche sich aus der Energieeinsparverordnung (EnEV) ergibt, erlangt werden. Hinzu kommt, dass die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) bessere Förderbedingungen bei Krediten ermöglicht (Bagda, et al., 2016).
Ein weit verbreiteter Fehler bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit von PV-Fassaden ist, dass ein Vergleich des Ertrages zu einer PV-Aufdachanlage gezogen wird. Dabei werden die reinen Amortisierungszeiten der PV-Systeme verglichen. Dieses Vorgehen ist meist nicht sinnvoll, da dabei ausgeblendet wird, dass eine PV-Fassade eine Funktionszusammenlegung (Stromerzeugung und Fassadenbekleidung) darstellt. Dies bedeutet, dass die Materialeinsparung der normalen Fassadenbekleidung bei der Amortisierungsrechnung berücksichtigt werden muss. Weiterhin fließen bei der Kaufentscheidung einer PV-Fassade auch nicht-monetäre Faktoren mit ein. So kann eine PV-Fassade mit hochwertig-ästhetischem Design schon vor Betreten des Gebäudes den Eindruck eines zukunftsorientierten Unternehmens vermitteln. Die Entscheidungskriterien Gestaltung, Ökonomie und Ökologie stehen in Wechselwirkung miteinander und werden von Fall zu Fall unterschiedlich gewichtet und bewertet.
Seit Jahren wird zudem intensiv an der Verbesserung des Wirkungsgrades, der Gestaltungsvielfalt und an kostengünstigeren Produktionsabläufen gearbeitet. Vor allem durch diese Weiterentwicklung und Optimierung sowie den steigenden Absatz bei PV-Komponenten betrugen 2013 die Kosten für einen Kilowatt solaren Strom nur noch 1/10 der Anfangskosten Ende der 80er Jahre (Agentur für Erneuerbare Energien, 2016).

Analysemethoden

Für eine ökonomische Abschätzung der im SOLAR*shell* entwickelten BIPV-Varianten hinsichtlich Marktrelevanz und Wirtschaftlichkeit wurde nach effektiven Bewertungsmethoden für Produktentwicklungen gesucht und ihre Eigenschaften kurz zusammengefasst.

Ganzheitliche Produktbetrachtung (Conjoint-Analyse)

Die Conjoint-Methode wird genutzt, um Kaufabsichten, Präferenzen und Meinungen von Verbrauchern zu Produkten, Dienstleistungen oder Konzepten darzustellen. Dabei werden zunächst die spezifischen Produkteigenschaften durch den Entwickler zusammengestellt, um in einer Kundenumfrage schließlich ein konkretes Feedback zum Produkt zu erhalten. Die Bewertung der Befragten bezieht sich dann auf eine Gesamtbeurteilung von Produktkombinationen, die anschließend in Einzelurteile bezüglich der Merkmale und Ausprägungen dieser Produkte zerlegt wird.

Vorteil der Conjoint-Analyse ist, dass sie dem tatsächlichen Bewertungsprozess einer realen Kaufsituation entspricht, in der der Käufer ebenfalls „ganzen" Produkten gegenüber steht. Der Befragte wird dazu gebracht, die Bedeutung der verschiedenen Eigenschaften des Produktes relativ zueinander abzuwägen und sich die tatsächliche Bedeutung der einzelnen Merkmale bewusst zu machen.

Nach Auswertung der Umfrageergebnisse können ggf. Produktanpassungen vorgenommen werden (Kaltenborn, Fiedler, Lanwehr, & Melles, 2013), (Meyer, Schwaiger, & Fuchs, 2009).

Zielkostenrechnung (Target Costing)

Das Target Costing beantwortet die Frage: „Was darf ein Produkt kosten?" nach dem Aufstellen der Funktionen und Vorteile eines Produkts sowie seiner technischen Spezifikationen wird ein sog. „Matching" (= Abgleich/Anpassung) vorgenommen. Dieses untersucht:

- Welche technischen Komponenten dazu führen, dass benötigte Funktionen erfüllt werden
- Welche Funktionen ggf. entbehrlich sind
- Was technische Komponenten kosten dürfen
- Welche Potentiale zur Reduktion der Kosten bestehen
- Die Preise, Eigenschaften und den Mehrwert von aktuellen Produkten am Markt und vergleicht sie mit dem zu untersuchenden Produkt
- Hinsichtlich des Produktvertriebes die Potentiale, die für jeden Beteiligten in der Entwicklung stecken (Dirnberger, 2013)

2.5.2 Ökologische Kriterien

Weltweit steigende Bevölkerungszahlen bei gleichzeitig steigendem Lebensstandard haben zur Folge, dass stetig mehr Energie benötigt wird. Gleichzeitig werden die begrenzten Ressourcen kontinuierlich knapper. Inzwischen hat hinsichtlich der Energieerzeugung ein Umdenken begonnen; der Einsatz erneuerbarer Energieerzeuger, wie Wind, Wasser und Sonne ist auf dem Vormarsch. Denn diese sind umweltschonend, emissionsfrei und unbegrenzt verfügbar. Allein die Sonne liefert 15.000 Mal so viel Energie, wie derzeit weltweit verbraucht wird (Alt, 2004). Die globale Energieversorgung kann heute und auch zukünftig sicher durch Erneuerbare gedeckt werden.

Die Vorteile der Solarenergie liegen dabei auf der Hand: sie läuft störungsfrei, erzeugt keine Emissionen oder radioaktive Abfälle und besitzt einen Energievorrat für weitere 5 Mrd. Jahre (Alt, 2004).
Zudem wird durch die Nutzung von PV-Strom aus Eigenerzeugung die Bilanz eines Gebäudes verbessert. Um dies auch in Zahlen ausdrücken und beurteilen zu können, kann ein Gebäude mittels Zertifizierungssystem eingeordnet werden. In den letzten Jahren wurde weltweit eine Vielzahl von Bewertungswerkzeugen entwickelt; Tab. 6 fasst die wichtigsten zusammen.

Tab. 6: Gebäudezertifizierungssysteme, aus: (Ebert, et al., 2010)

ZERTIFIZIERUNGSSYSTEM	METHODIK	ANWENDUNGSBEREICHE	MARKTDURCHDRINGUNG
BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method)	Zertifizierungsprozess umfasst die verschiedenen Herstellungsphasen in Planung und Bau	Neubauten, Umbauten/ Sanierungen, Ausbauten sowie Bewertungen von Rohbau und Gebäudehülle	Anwendung weltweit, Schwerpunkt: Großbritannien (Gründungsland)
LEED (Leadership in Energy & Environmental Design)	zweiphasiger Zertifizierungsprozess: Planungsphase & Ausführungsphase bei Bestandsgebäuden: Durchführungs- & Überprüfungsphase	Neubauten, Generalsanierungen, veredelte Rohbauten, Bestandsgebäude	Vor allem USA (Gründungsland)
DGNB Zertifikat (Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen)	ganzheitlicher Zertifizierungsansatz, bei dem sowohl ökologische, ökonomische, soziokulturelle als auch technische, prozessorientierte und standortspezifische Nachhaltigkeitsaspekte in die Bewertung einfließen	Neubau Büro- & Verwaltungsgebäude (Modernisierung Büro- & Verwaltungsgebäude sowie Neubau weiterer öffentlicher Gebäude in Entwicklung)	Vor allem Deutschland (Gründungsland), aber auch zunehmende internationale Verbreitung
MINERGIE	neben dem Umweltfaktor Energie werden auch Komfort, Werterhaltung & Wirtschaftlichkeit berücksichtigt; Nachweisverfahren mit festgelegtem Schema	Wohnen, öffentliche Gebäude, Industriebauten, Sportbauten, Restaurants, Lager	Vor allem Schweiz (Gründungsland), aber auch zunehmende internationale Verbreitung
EU-GreenBuilding-Programm	Bewertung der Energieeffizienz des Gebäudebetriebs	Öffentliche & private Nichtwohngebäude	Europa

Die beschriebenen Systeme sind jedes für sich äußerst komplexe Bewertungstools. Gleich ist ihnen allen, dass sie ganze Gebäude betrachten, nicht jedoch Einzelprodukte. Um dennoch eine ökologische Bewertung von BIPV-Fassaden vornehmen zu können, kann diese in Anlehnung an einzelne Bewertungskriterien erfolgen. In Deutschland kommt v. a. das DGNB-Zertifizierungssystem zur Anwendung, welches darauf abzielt, die ganze Bandbreite der Nachhaltigkeit (ökologische, ökonomische, soziokulturelle, technische und prozessorientierte Qualität sowie Standortqualität) abzubilden (DGNB, 2016). Für eine Ökobilanzierung von Einzelbauteilen bzw. Fassaden ist es sinnvoll, sich an den ökologischen Einzelkriterien im Segment der ökologischen Qualität zu orientieren. Zu erwähnen ist, dass darin die Kriterien „Treibhauspotential" und „nicht erneuerbare Primärenergie" einen hohen Stellenwert einnehmen.

Da die Kombination verschiedener PV-Technologien mit Fassadenmaterialien ein neuartiger Ansatz ist, kann bei der Bewertung nicht auf fundierte Sachbilanzen zurückgegriffen werden. Deshalb muss mit vergleichbaren Sachbilanzen oder Schätzwerten gearbeitet werden, wodurch nur eine orientierende Wirkungsabschätzung erfolgen kann. Als Betrachtungszeitraum sind entsprechend des DGNB-Systems 100 Jahre anzusetzen. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei ausschließlich die äußere Fassadenebene, die dazugehörigen benötigten Befestigungskomponenten sowie die benötigte Elektrotechnik inkl. Verkabelungsaufwand der Fassade. Damit soll der Einfluss der dahinterliegenden Fassadenkonstruktionen auf das Ergebnis ausgeschlossen und eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Varianten untereinander und mit einem Referenzsystem gewährleistet werden.
Um im Anschluss die ökologische Amortisationszeit zu bestimmen, wird die durch die Fassade regenerativ erzeugte Energie als Gutschrift in den jeweiligen Umweltwirkungen berücksichtigt. Als Referenzwerte können hier die Umweltwirkungen des deutschen Strommixes angesetzt werden. Pro regenerativ erzeugter kWh/a muss im Strommix entsprechend weniger produziert werden, sodass die Einsparungen von der ermittelten Gesamtsumme direkt abgezogen werden können. Ab dem Zeitpunkt, ab dem negative Werte in der Umweltwirkung ausgewiesen werden, hat sich die PV-Fassade amortisiert.

2.6 Kontaktierungs- & Verschaltungsprinzipien

Kontaktierung
Solarzellen müssen, um verschaltet werden zu können, zunächst kontaktiert werden. Hierfür gibt es entsprechend der unterschiedlichen PV-Zelltypen unterschiedliche Möglichkeiten. Grundsätzlich kann am Beispiel monokristalliner Siliziumzellen zwischen Front- und Rückseitenkontaktierung unterschieden werden. Der Vorteil einer rückseitigen Kontaktierung ist eine aufgrund der nicht sichtbaren metallischen „Finger" homogene Erscheinung der Frontseite. Kommt eine organische PV-Zelle zum Einsatz, besteht im Gegensatz zum streng orthogonalen Kontaktierungslayout der kristallinen PV die Möglichkeit einer freien Struktur.

Verschaltung
Bei der Verschaltung von fassadenintegrierten PV-Modulen gibt es drei verschiedene Herangehensweisen. Die Module können in Reihe, parallel oder in einer Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung verschaltet werden. Es folgt ein kurzer Überblick über die verschiedenen Methoden und deren spezifische Vor- und Nachteile.

<u>Reihenschaltung</u>
Die PV-Module sind zumeist in Reihe zu PV-Strings geschaltet. Dies bedeutet, dass jeweils der Minuspol des vorherigen Moduls mit dem Pluspol des nachfolgenden verschaltet wird. Dadurch wird die elektrische Gleichstromspannung (U) aufsummiert, die Stromstärke (I) bleibt konstant.

Vorteil

- Durch die in Reihe verschalteten Module werden Kabellängen und zusätzliche Steckverbindungen eingespart

Nachteil

- Bei abweichenden Kennwerten der PV-Module untereinander wird die Leistung des gesamten in Reihe geschalteten Strings an das schwächste Modul angepasst. Dies bedeutet, dass niedrigere Erträge als eigentlich möglich erzielt werden

Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung sind die PV-Module auf einer Sammelleitung verschaltet und alle Plus- und Minuspole bis zum Wechselrichter getrennt geführt. Zwischen den PV-Modulen werden Y-Stecker als „Weiche" verwendet.

Vorteile

- Die Erträge sind höher, da die Abweichungen der elektrischen Kennwerte der PV-Module auf die Gesamtleistung nur wenig Einfluss hat
- Durch die Parallelschaltung ist der Einfluss einer Verschattung der Module geringer
- Die Gleichstromspannung (U) summiert sich nicht, lediglich die Stromstärke (I) erhöht sich, daher kann ein kostengünstiger Gleichstromwechselrichter für geringere Spannungen eingebaut werden

Nachteile

- Der Gleichstromwechselrichter für geringere Spannungen hat einen geringeren Wirkungsgrad als bei höheren Spannungen
- Die Kosten für Kabel und Stecker (besonders die Y-„Weiche") sind wesentlich höher
- Durch die längeren Kabelwege entsteht ein höherer Stromverlust

Kombination von Reihen- & Parallelschaltung

Bei PV-Anlagen wird zumeist eine Kombination aus Parallel- und Reihenschaltung realisiert. Dabei werden die PV-Modulreihen in Reihe geschaltet und parallel auf Sammelstrings verschaltet.

Vorteile

- Die Kombination erzielt die höchste Wirtschaftlichkeit

Nachteile

- Um die nachhaltigste und wirtschaftlichste Variante zu evaluieren, müssen in der objektbezogenen Planung sämtliche Kombinationen aufwändig verglichen werden

Verkabelung

Bei der Verlegung und Planung der Steig- und Sammelleitungen der Kabelstrings muss darauf geachtet werden, dass diese zugfrei und nicht über reibende Kanten verlegt werden. Außerdem müssen sie trocken und vor Nagetieren geschützt verlegt werden. Da die Gleichstromspannungen im String sehr hoch sind, werden bei einer Beschädigung von Kabeln starke Lichtbögen frei.

Verkabelung der PV-Anschlussdose

Auf den PV-Modul-Rückseiten befinden sich Anschlussdosen. Von diesen gehen zertifizierte Solarkabel (Kennzeichen „PV1-F“) mit verpolungssicheren Steckkopplungen ab (siehe Abb. 6). In der Anschlussdose der in Reihe geschalteten PV-Module befindet sich zudem eine Bypass-Diode, die das PV-Modul gegen Schäden sichert.

Abb. 6: PV-Anschlussdose | Quelle: http://sc02.alicdn.com/kf/HTB1lHjkIpXXXXajXXXXq6xXFXXXr/Junction-box-Solar-panel-Junction-Box-TUV.jpg

Bypass-Diode

Durch die Bypass-Diode wird bei einer auftretenden Teilverschattung des Moduls ein Temperaturanstieg im Inneren und damit sogenannte „Hot-Spots“ verhindert. Ist ein Modul teilverschattet, wird die verschattete Zelle zum Widerstand. Durch den Strom der anderen PV-Module am String erwärmt sich das PV-Modul, was zu dauerhaften Schäden führen kann. Wird ein PV-Modul zu einem Widerstand, öffnet sich die Bypass-Diode, sodass der Strom am verschatteten Modul vorbei geleitet wird (siehe Abb. 7).

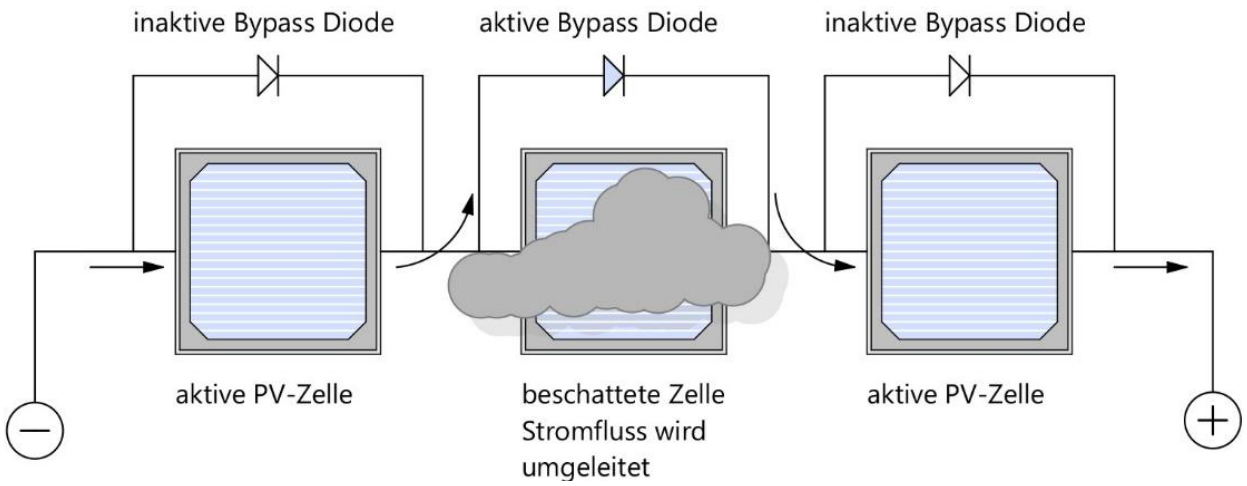


Abb. 7: Bypass-Diode wird an der verschatteten PV-Zelle aktiv | Zeichnung: S. Knechtges, ai:L

In den Fassadenentwicklungen des SOLAR*shell* sind die PV-Module kleiner als Standard-PV-Modul-Größen. Zur Vermeidung eines „Hot-Spots" muss deshalb an jedes Modul eine Bypass-Diode angebracht werden. Technisch stellt dies keine große Herausforderung dar, es entstehen jedoch höhere Produktionskosten bei der Fertigung der Module.

2.7 Baurechtliche Voraussetzung

Gebäudeintegrierte Photovoltaik muss als Bauprodukt und Stromgenerator sowohl baurechtliche als auch elektrotechnische Anforderungen erfüllen. In der Norm DIN EN 50583 (Photovoltaik im Bauwesen) sind BIPV-Systeme dementsprechend beschrieben.

Elektrotechnische Vorschriften aus der europäischen Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (LVD)
Die in der LVD (Low Voltage Directive) beschriebenen Anforderungen an die BIPV dienen dem Schutz vor Gefahren, welche von den elektrischen Komponenten ausgehen können sowie dem Schutz der elektrischen Komponenten selbst vor äußeren Einflüssen. Für den sicheren elektrischen und mechanischen Betrieb der BIPV gelten zudem die Vorschriften der DIN EN 61730 (Photovoltaik-Module - Sicherheitsqualifikation). Mithilfe dieser Norm wird das PV-Modul mit all seinen Einzelteilen im Ganzen betrachtet. Die Norm umfasst den Glasverbund mit den Solarzellen, den Verschaltungen, der Anschlussdose, den Anschlusskabeln und den Steckverbindern. Außerdem beschreibt sie die Prüfanforderungen an die Module, sodass diese in die zugehörigen Schutzklassen nach DIN EN 61140 eingeordnet werden können. Die Voraussetzung für die Anbringung von BIPV-Modulen in öffentlich zugänglichen Bereichen ist eine Klassifizierung in die Schutzklasse II oder III nach DIN EN 61730 Teil 1. Darüber hinaus gelten für kristalline Silizium-PV-Module die Anforderungen der DIN EN 61215 (Terrestrische kristalline Silizium-Photovoltaik-Module - Bauarteignung und Bauartzulassung) sowie für Dünn-schicht-Module die Vorgaben der DIN EN 61646 (Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik-Module - Bauarteignung und Bauartzulassung). Die rechtmäßige Einhaltung der Anforderung wird von einer akkreditierten Stelle zertifiziert. Die zertifizierten PV-Module werden anschließend mit einem CE-Kennzeichen (nach der Produktdeklarationsnorm DIN EN 50380) versehen. Auf dem CE-Kennzeichen sind Schutzklasse und zugehörige elektrische Kenndaten nach DIN EN 61730-1 ersichtlich. Mit der Zertifizierung bestätigt der Hersteller die Konformität des BIPV-Moduls mit der LVD. Final bedarf das Modul noch der Bestätigung der Konformität mit der BauPVO, welche separat nachgewiesen werden muss. (DAW SE & GWT-TUD GmbH, 2016)

Baurechtliche Anforderungen nach europ. Bauproduktenverordnung Nr. 305/2011 (EU-BauPVO)
BIPV muss als Bauprodukt sowohl der EU-BauPVO als auch nationalen Regelwerken entsprechen. Die wesentlichen Anforderungen sind:

Mechanische Widerstandsfähigkeit und Nutzungssicherheit, geregelt z. B. in:
- DIN EN 1991-1 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke
- DIN 18516: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet
- DIN EN ISO 12543: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas
- DIN EN 12600: Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung
- DIN EN 13022: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen

Brand- und Schallschutz, geregelt z. B. in:
- DIN EN 13501: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihren Brandverhalten
- DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
- DIN 4109: Schallschutz im Hochbau

Wärme- und Feuchteschutz, geregelt z. B. in:
- DIN 4108: Energieeinsparung in Gebäuden
- DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden

2.8 Zusammenfassung der Grundlagen

Für die Planung solar optimierter BIPV-Fassaden steht eine Vielzahl von PV-Technologien, Fassadensystemen sowie -materialien zur Verfügung, die auf unterschiedliche Weise miteinander kombiniert werden können. Dabei erweisen sich dreidimensional formbare Fassadenmaterialien wie Metalle, Beton, Ziegel und Kunststoffe als besonders geeignet: Ausgeführt als vorgehängte hinterlüftete Fassaden, Sandwich-Fassaden, Verblendungen bzw. Vorhangfassaden sind sie unabhängig vom statischen System des Gebäudes und erlauben somit eine nahezu freie Formgestaltung der Außenschale.
Durch das solar optimierende parametrisch-generative Entwurfsverfahren entsteht eine neue Formensprache für Solarfassaden, die nicht mehr nur gestalterischen, sondern auch energetischen Anforderungen als wichtigem Gestaltungsaspekt gerecht werden muss.
Die Wirtschaftlichkeit von PV-Fassaden stellt ein komplexes Thema dar. Bei ihrer Ermittlung müssen grundlegend alle anfallenden Kosten, sowohl zur Errichtung der Anlage als auch zu ihrer Unterhaltung mit der Stromeinsparung und der Einspeisevergütung gegengerechnet werden. Hier zeigt sich, inwieweit der Mehraufwand für Verschaltung und Verkabelung der kleineren Module durch höhere Erträge pro Quadratmeter PV-Fläche ausgeglichen werden können. Nichtsdestotrotz ist der gestalterische Mehrwert der kleineren Module zugunsten einer „Materialechtheit" der Fassade ein wichtiges Entscheidungskriterium, das höchstvermutlich großen Einfluss auf die spätere Einsatzhäufigkeit in Gebäuden hat.
Um die entwickelten PV-Fassaden an Gebäuden installieren zu können, müssen eine Reihe ökonomischer, ökologischer und vor allem rechtlicher Rahmenbedingungen beachtet und eingehalten werden, da das Bauteil sowohl Stromerzeuger als auch Fassadenelement ist und damit alle bestehenden Richtlinien und Normvorgaben einhalten muss.

3 Voruntersuchungen

Im Fassadenkontext werden PV-Module gegenwärtig meist zusätzlich vor die Gebäudehülle gesetzt und wirken nicht integral mitgedacht, sondern appliziert (vgl. Abb. 8). Beim Zusammenspiel von PV und Verglasungen sind jedoch bereits bauteilintegrierte Designs erhältlich (vgl. Abb. 9).
Ansatz des Projektes SOLAR*shell* war es, PV-Komponenten mit verschiedenen Fassadenmaterialien zu kombinieren und diese im Entwurfsprozess als integrales Ganzes zu betrachten, um architektonisch anspruchsvolle BIPV-Fassaden zu realisieren. PV-Komponenten und Fassadenmaterialien sollten gestalterisch und funktionell eine Einheit bilden.

Abb. 8: BIPV-Fassade
Quelle: www.yoursunyourenergy.com

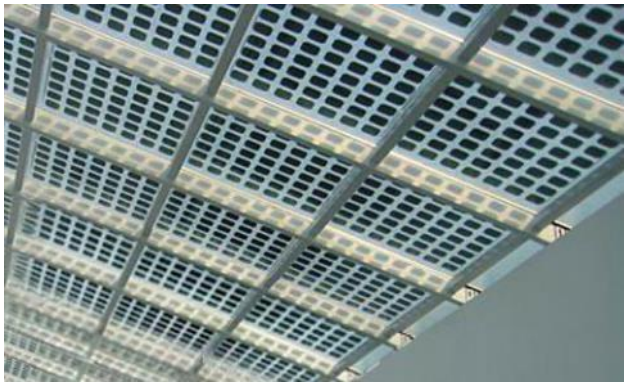


Abb. 9: Glasintegration von PV
Quelle: www.sunsmartus.com

3.1 Entwurf und Gestaltungsansätze solar optimierter Gebäudehüllen

3.1.1 Allgemeine Geometriestudien

Um herauszufinden, mit welchem geometrischen Prinzip eine Gebäudehülle gezielt verändert werden kann, um einen Nutzen für die Gewinnung solarer Energie zu erzielen, wurde zunächst eine breite Vorrecherche durchgeführt. Die dabei zusammengestellten Geometrieansätze wurden zunächst ohne Maßstab und Material gedacht, sie zeigen vielmehr geometrische Potentiale auf, indem sie zweidimensionale Flächen in eine räumlich-dreidimensionale Struktur transformieren.

<u>Aufgebogene Lamellen</u>
Eine Platte wird linear eingeschnitten (siehe Abb. 10). Über einen Verformungsprozess wird die zweidimensionale Fläche in eine dreidimensionale Struktur transformiert (siehe Abb. 11). Das Potential dieses einfachen Ansatzes liegt in der Modulierbarkeit von Ausrichtung und Ausstülpungsgrad der Streifen, um eine Nutzbarkeit als PV-aktive Fläche zu erreichen. Das wechselseitige Ein- und Ausstülpen der Lamellen ergibt zudem die Möglichkeit, Fassadenöffnungen zu generieren. Ausgestülpte Lamellen können durch Torsion in der Längsachse darüber hinaus solar optimiert ausgerichtet werden. Je nachdem, wie komplex die Verformung der Lamelle ist, muss eine mehr oder weniger flexible PV-Technologie zum Einsatz kommen. Bei eindimensional gekrümmten Lamellen wäre z. B. eine einachsig biegbare Silizium-Zelle denkbar. Mehrfach gekrümmte Lamellen könnten mit flexibleren organischen PV-Zellen abgebildet werden.

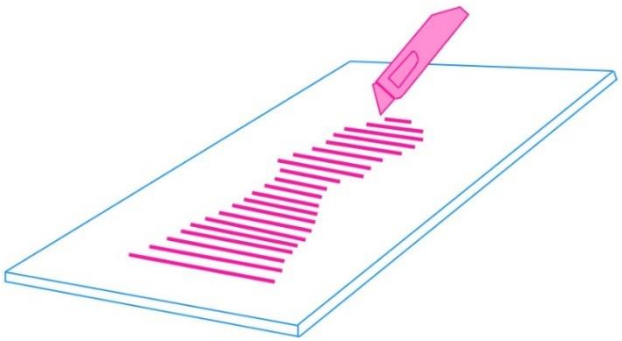


Abb. 10: Linear eingeschnittene PVC Platte

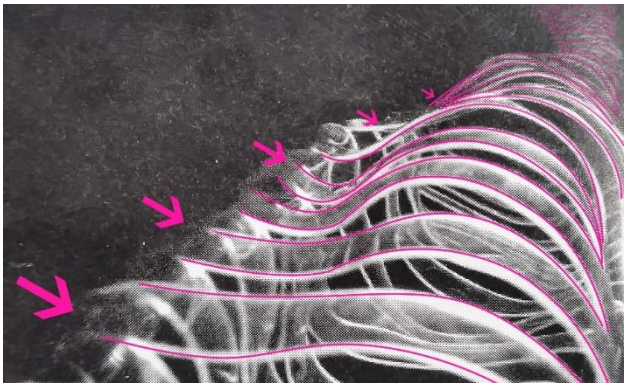


Abb. 11: Thermisch verformte PVC Platte
Quelle: (Agkathidis, Hudert, & Schilling, 2009, S. 20)

Perforierte Fläche

Eine Fläche wird im regelmäßigen orthogonalen Raster linear eingeschnitten (siehe Abb. 12). Durch Biegen und Zusammendrücken der perforierten Fläche ergeben sich Aufwölbungen. Diese generieren Bereiche, die für eine PV-Belegung günstig sein können. Wie in der vorangegangenen Geometriestudie wäre hier der Einsatz organischer PV-Technologie denkbar. Die entstehenden Öffnungen können, bezieht man die Struktur auf eine Fassadenfläche, zur Belichtung von Innenräumen genutzt werden.

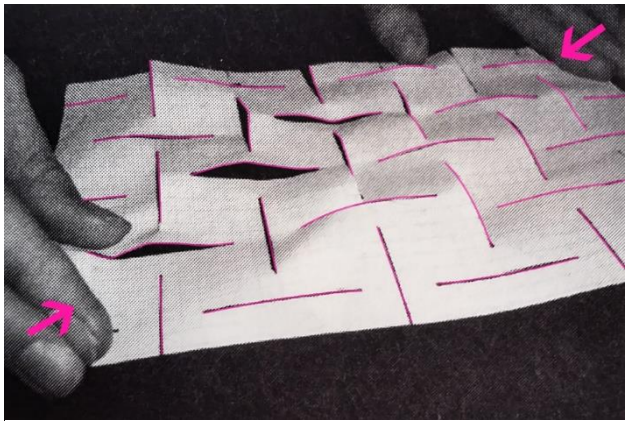


Abb. 12: Verformung der eingeschnittenen Fläche
Quelle: (Agkathidis, Hudert, & Schilling, 2009, S. 24)

Lineare Schichtung

Durch Faltung von Papierstreifen in wählbaren Winkeln entstehen Flächen mit unterschiedlichen Orientierungen (siehe Abb. 13). Solar günstig ausgerichtete Flächen können dabei mit Photovoltaikelementen belegt werden.
Durch die vorteilhafte Planarität und Orthogonalität der Teilflächen ist der Einsatz von Standard-Silizium-Zellen möglich. Ein lineares Akkumulieren der Streifen in horizontaler oder vertikaler Ausrichtung wirkt sich maßgeblich auf die Fassadenerscheinung aus.

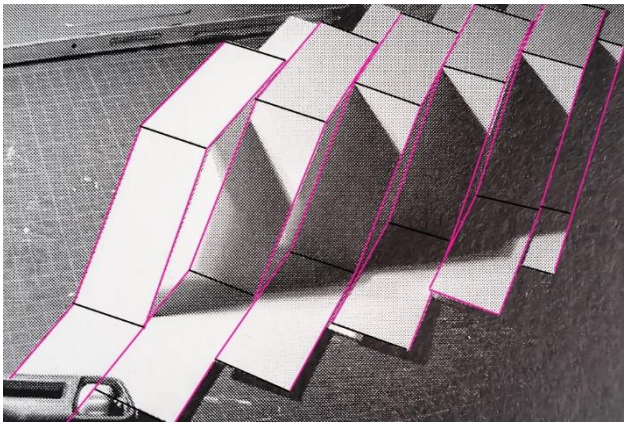


Abb. 13: Linear akkumulierte Faltstreifen
Quelle: (Agkathidis, Hudert, & Schilling, 2009, S. 32)

Triangulierte Facettierung

Mithilfe einer räumlichen Triangulierung einer Fläche (siehe Abb. 14) können unterschiedlichste dreidimensionale Strukturen nachgebildet werden. Dieses große Maß an Flexibilität macht eine unter dem Aspekt der solaren Einstrahlung sinnvolle Orientierung von Teilfacetten möglich. Da eine Nachbildung von Dreiecksflächen mit Standard-Silizium-Zellen aufgrund von entstehenden Restflächen eher ungünstig, ist müsste hier auf eine organische PV-Technologie zurückgegriffen werden. Soll dennoch auf Standardzellen zurückgriffen werden, wäre eine Substitution einiger Dreiecksflächen durch rechtwinklige Facettenflächen im System umsetzbar.

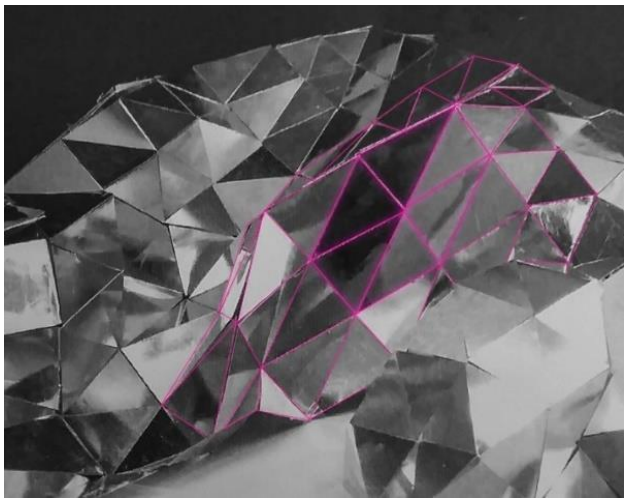


Abb. 14: Räumlich triangulierte Struktur
Quelle: (Agkathidis, Hudert, & Schilling, 2009, S. 46)

Multidirektionale Faltung

Eine planare textile Struktur wurde über 2-Achsen verformt (siehe Abb. 15). Es zeigt sich, dass die Stabilität der Struktur zunimmt, je stärker die Matte verformt wird. Abb. 16 zeigt einen 3D-Druck eines digitalen Modells, welches in 3-Achsen verformt wurde. Beide Modelle belegen, dass durch Bestimmung entsprechender Randparameter der Verformung solar aktivierbare Bereiche erzeugt werden können. Vorausgesetzt wäre hierbei eine möglichst flexible PV-Technologie wie z. B. organische PV-Zellen.

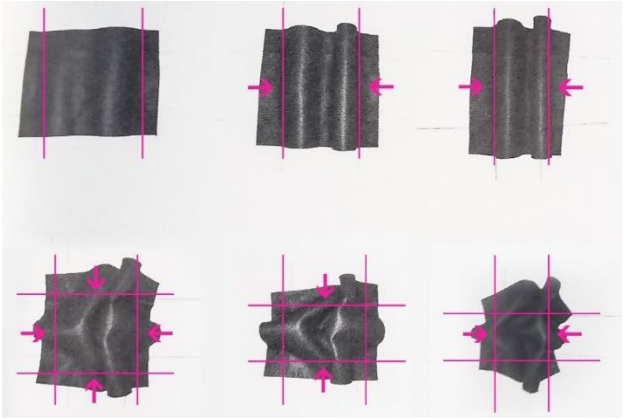


Abb. 15: Multidirektional verformter Filz
Quelle: (Agkathidis, Hudert, & Schilling, 2009, S. 49)

Abb. 16: Dreidimensionale Faltenstruktur, 3D-Druck
Foto: A. Heller, ai:L

V-Falten Gitter

Die folgende Origamistudie nach dem V-Faltenprinzip (siehe Abb. 17) eröffnet Flächen mit unterschiedlichen solaren Potentialen. Die langgestreckten Parallelogramm-Lamellen, welche jeweils von einem sogenannten Falten-Tal und einem Falten-Berg begrenzt sind, bieten sich aufgrund der Ausrichtung für eine Belegung durch Photovoltaik-Flächen in z. B. einer Westfassadenausrichtung besonders an.

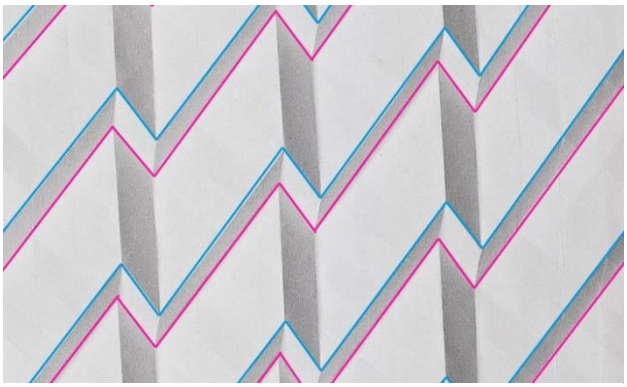


Abb. 17: V-Falten-Gitter | Foto: A. Heller, ai:L

Quasikristalle

Anders als normale kristalline Strukturen, deren molekulare Muster sich in alle Richtungen periodisch gleichförmig fortsetzen, zeichnen sich Quasikristalle dadurch aus, dass ihre Struktur sich an keiner Stelle auf die gleiche Weise wiederholt. Sie ist unendlich, uneinheitlich, kann aber vorteilhafterweise mit einer geringen Anzahl an modularen Elementen gebildet werden (siehe Abb. 18). Für eine Fassadengestaltung bietet sie somit den Vorteil der Effizienz einer modularen Struktur ohne die ggf. eintönige Wirkung der Wiederholung. Grundsätzlich ist eine Nutzung von PV-Elementen an exponierten Kristallflächen denkbar. Da sich die Struktur nicht aus orthogonalen Flächen, sondern aus Rhomben, Sechsecken etc. zusammensetzt, ist hier der Einsatz organischer PV-Zellen günstig.

Abb. 18: Quasikristalline Struktur
Quelle: (Aranda & Lasch, 2008)

Fazit

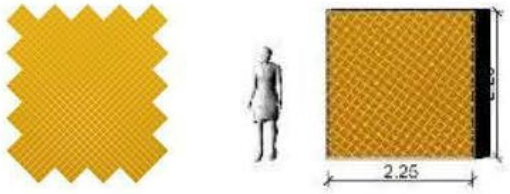
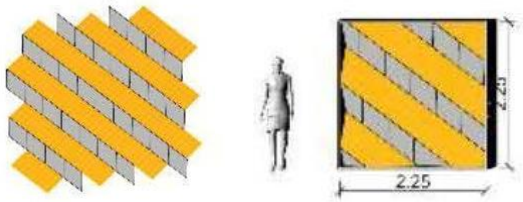
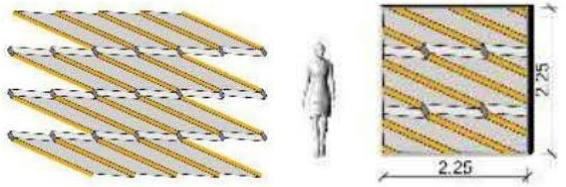
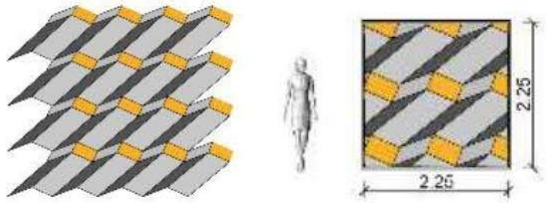
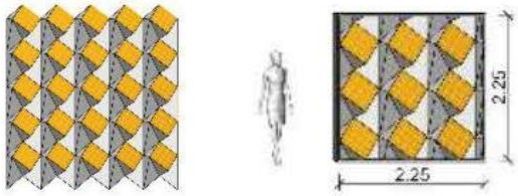
In Rücksprache mit den Projektpartnern wurde im SOLAR*shell* zunächst auf Entwurfsansätze fokussiert, die mit Silizium-PV (kristalliner PV) realisierbar sind, da diese den höchsten Wirkungsgrad aller marktverfügbaren Technologien bei gleichzeitig geringstem Preis je Quadratmeter besitzt. Dies bedeutet nach heutigem Stand der Technik Einschränkungen für die Formgestaltung der PV-Komponenten, da die PV-Zellen ausschließlich im Rechteckformat hergestellt werden können und zudem nicht flexibel sind.

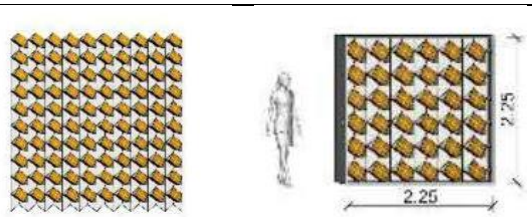
3.1.2 Kleinmaßstäbliche solare Vorberechnungen

Basierend auf den durchgeführten Geometriestudien und der eigenen Vorgabe, zunächst mit Standard-Siliziumzellen zu arbeiten, wurden erste Vorberechnungen der zu erwartenden solaren Einstrahlung angestellt. Der dafür genutzte Testfassadenausschnitt wurde quadratisch in den Dimensionen von 2,25 m x

2,25 m erstellt und ist nach Westen orientiert. Diese Fassadenausrichtung wurde beispielhaft gewählt, da im urbanen Kontext üblicherweise wenig Fassadenflächen mit einer reinen Südausrichtung auftreten und sich eine westliche Orientierung auch gut auf eine östliche übertragen lässt. Die Ausrichtung der PV-aktiven Flächen in den gewählten Geometrievarianten wurde in einem vereinfachten Prozess optimiert und unter Einbeziehen der benachbarten Elemente (hinsichtl. Eigenverschattung) auf die resultierende solare Einstrahlung berechnet. Die gegenübergestellten Varianten weisen unterschiedliche Maßstäbe (Einzeller- und Mehrzellermodule) auf. Um sie miteinander vergleichen zu können, wurde jeweils der Energieeintrag je Quadratmeter PV-Fläche, die gesamte PV-Fläche und der gesamte Energieeintrag auf dem Testausschnitt dargestellt (vgl. Tab. 7).

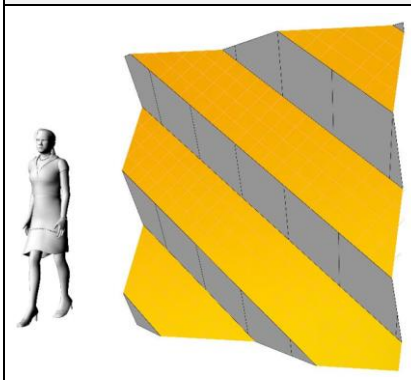
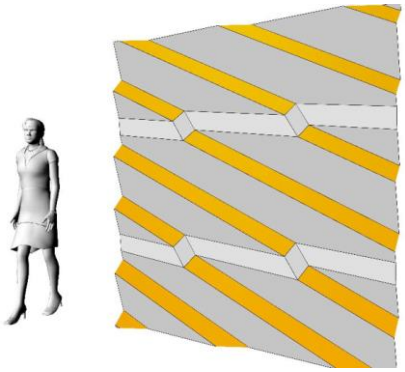
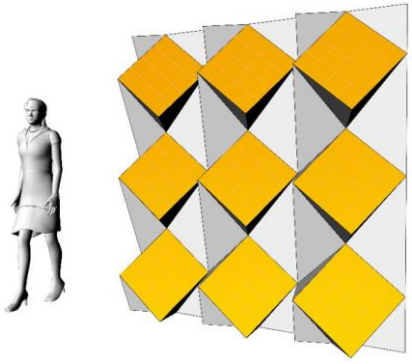
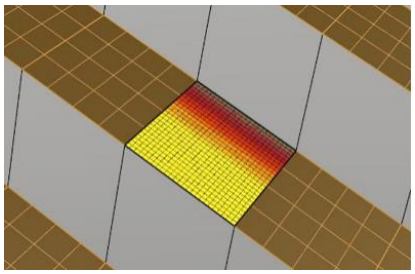
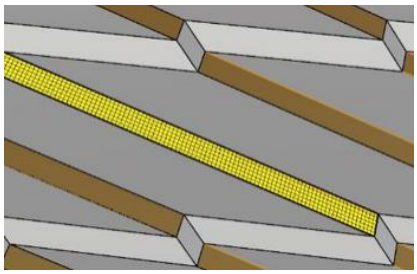
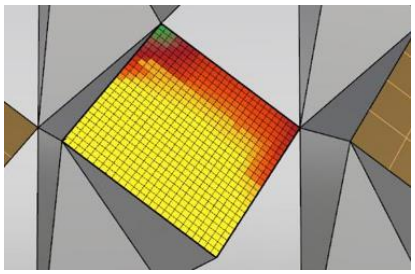
Tab. 7: Gegenüberstellung der Geometrievarianten

VARIANTE	DARSTELLUNG	EINGESETZTE PV-FLÄCHE [m²]	ENERGIE-EINTRAG [kWh/(m²a)]	GESAMTENER-GIEEINTRAG [kWh/a]
Planar		5,06 (= 100 %)	361,4 (= 100 %)	1.829,8 (= 100 %)
Faltung 1		3,16 (= 62 %)	451,0 (= 124 %)	1.426,4 (= 88 %)
Faltung 2		1,51 (= 30 %)	524,2 (= 145 %)	791,5 (= 43 %)
Facette 1		1,57 (= 31 %)	497,7 (= 138 %)	781,4 (= 43 %)
Facette 2		2,25 (= 44 %)	466,0 (= 129 %)	1.048,5 (= 57 %)

Facette 3		2,25 (= 44 %)	459,2 (= 127 %)	1.033,2 (= 56 %)
Facette 4		2,25 (= 44 %)	452,1 (= 125 %)	1.017,3 (= 56 %)

In der nachfolgenden Tabelle sind drei der bsph. Geomatrievarianten herausgestellt und näher erläutert:

Tab. 8: Vergleich ausgewählter Geometrievarianten

FALTUNG 1	FALTUNG 2	FACETTE 2
		
		
- PV-Komponente bestehend aus einem 16-Zeller-Modul - bester Gesamtenergieeintrag im Vergleich (1.426,4 kWh/a) - die Falschfarbendarstellung zeigt Bereiche mit leichten temporären Verschattungseffekten	- PV-Komponente bestehend aus einer 12-Zeller Lamelle - beste Ausnutzung der eingesetzten PV (524,2 kWh/m^{2}pv*a) - Falschfarbendarstellung zeigt eine vernachlässigbar kleine Eigenverschattung	- PV-Komponente bestehend aus einem 16-Zeller Modul - guter Gesamtenergieeintrag (1.048,5 kWh/a) - gute Ausnutzung der eingesetzten PV (466,0 kWh/m$^2_{pv}$*a) - Falschfarbendarstellung zeigt Bereiche mit leichten temporären Verschattungseffekten

Variantenauswertung & Fazit

Die Vorberechnungen anhand verschiedener Geometrien belegen eine deutliche Steigerung der möglichen Energieerträge durch solar optimierte Ausrichtung. Damit kann die eingesetzte PV im Vergleich zur planaren Anwendung deutlich effizienter genutzt werden. Die Faltungsvariante mit PV in Lamellenform ist dabei aufgrund der geringsten Eigenverschattung als besonders vorteilhaft zu nennen. Gleich ist allen Vorberechnungsgeometrien jedoch, dass die integrierte PV dem Jahresverlauf der Sonne entsprechend eingedreht bzw, aus der Vertikalen gekippt ist. Um dies in Fassaden umsetzen zu können, muss die Modulgröße im Vergleich zu gängigen Standardformaten deutlich verkleinert werden. Dementsprechend sind nicht mehr 100 %, sondern teilweise nur noch 30 % der Fassadenoberfläche mit PV belegt, sodass der maximal erreichbare Gesamtenergieeintrag einer Gebäudehülle bei alle Varianten geringer ist als bei der planaren Variante. Allerdings sammelt die optimierte PV die solare Energie um bis zu 45 % effizienter ein und die eingesetzten Fassadenmaterialien (Metall, Beton etc.) bleiben sicht- und erlebbar. Dies bedeutet eine neue Qualität für BIPV und kann dazu führen, dass diese sich zukünftig hinsichtlich Form- und Materialvielfalt enorm weiterentwickelt.

3.1.3 Fallstudien im urbanen Kontext

Um nach den vorangegangenen kleinmaßstäblichen Untersuchungen in den Maßstab einer gesamten Gebäudefassade zu gelangen, wurden sowohl Fallstudien an einem konkreten Standort in Berlin, als auch Entwürfe für unterschiedliche Standorte in Leipzig durchgeführt.

3.1.3.1 Fallstudien am Standort Berlin

Für eine Fallstudie wurde eine Baulücke in einer typischen urbanen Situation in Berlin gesucht. Es handelt sich hierbei um eine Blockrandbebauung mit 6-geschossigen Gebäuden (vgl. Abb. 19). Die Testfassade weist Westausrichtung auf. Für die Fallstudie wurden zwei Fassadengeometrien erzeugt, wobei eine im Modulmaßstab gefaltet (vgl. Abb. 21), die andere im Zellmaßstab facettiert wurde (vgl. Abb. 22). Die Berechnung berücksichtigt alle Gebäude und Straßen, die in Abb. 19 zu sehen sind und weist diesen darüber hinaus Materialien zu, um die Menge an reflektierter Strahlung berücksichtigen zu können.

Abb. 19: Umgebungssituation Fallstudie

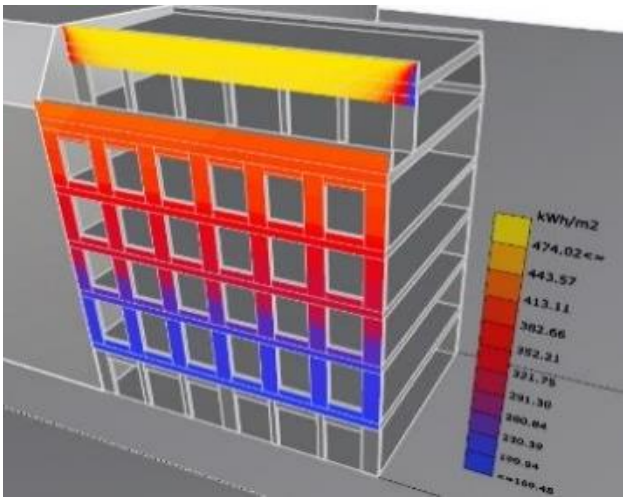


Abb. 20: Planare Referenzfassade

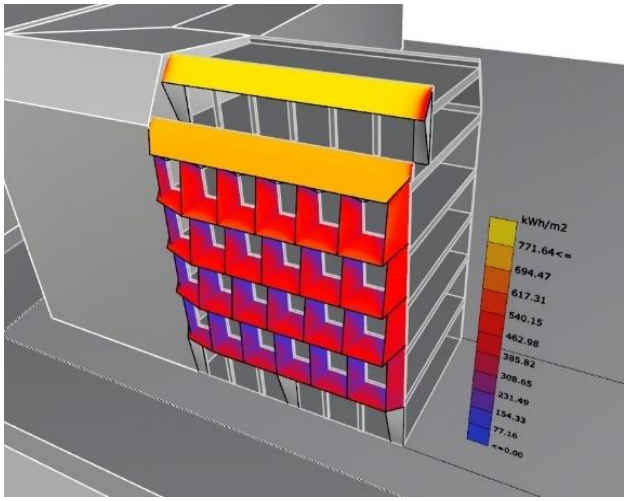


Abb. 21: Simulation der im Modulmaßstab gefalteten Fassade

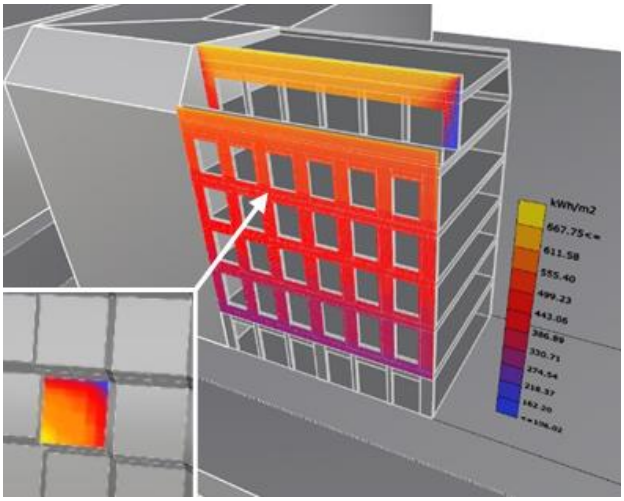


Abb. 22: Simulation der im Zellmaßstab facettierten Fassade

Insgesamt ergaben die Berechnungen in den zwei Varianten, dass eine Anwendung von PV-Zellen auf dreidimensional strukturierten Fassaden zu einer deutlichen Erhöhung der solaren Erträge im Vergleich zur einfachen planaren Applikation führt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die dreidimensionale Fassade mehr PV-Fläche generiert, welche aufgrund der Ausrichtungsoptimierung zudem einen höheren Ertrag pro Quadratmeter PV erzielt (vgl. Tab. 9 & Tab. 10). Beide Ergebnisse belegen die Vorteilhaftigkeit einer solaren Optimierung der PV-Flächen.

Tab. 9: Kennwerte der simulierten Fassadentypen

Fassadentyp	Fassadenfläche gesamt [m^2]*	PV-Fläche gesamt [m^2]	Solare Jahreserträge [kWh/a]	Solare Erträge pro Quadratmeter PV-Fläche [kWh/(m^2a)]
planar	247	242	95.954	397
gefaltet	537	311	153.235	493
facettiert	323	173	82.917	479

*ohne Fensterflächen

Tab. 10: Vergleich der unterschiedlichen Fassadentypen gegenüber einer planaren Fassade

Fassadentyp	Differenz der Fassadenfläche	Differenz der PV-Fläche	Differenz der solaren Jahreserträge	Differenz der Erträge pro Quadratmeter PV-Fläche
planar	0 %	0 %	0 %	0 %
gefaltet	+117 %	+29 %	+60 %	+24 %
facettiert	+31 %	-29 %	-14 %	+21 %

3.1.3.2 Studentenarbeiten Standort Leipzig

Um einen breiten Ideenpool zu Entwurfs- und Gestaltungsansätzen zu erzeugen, wurde das Thema der optimierten gebäudeintegrierten PV in die Lehre der HTWK Leipzig eingebunden und ein Entwurfsseminar mit Architekturstudenten durchgeführt. Schwerpunkte waren die architektonische Integration von PV in die Gebäudehülle unter Beachtung verschiedener städtebaulicher Situationen, der Umgang mit Ausrichtung und Verschattung sowie Optimierungsmöglichkeiten. Einige Entwurfsarbeiten sollen hier kurz vorgestellt werden.

Triangulierung

Ausgangspunkt des Entwurfes sind planare Dreiecksflächen, welche die Gebäudehülle bilden. Diese sind an lineraren Unterkonstruktionselementen mit vordefinierten oder frei wählbaren Befestigungspunkten an ihren Eckpunkten verankert (vgl. Abb. 23, Arbeitsmodell). Durch die Verschiebung der Eckpunkte entlang der Fassadennormalen auf der Unterkonstruktion lassen sich eine solare Optimierung und eine Formenvielfalt herstellen.

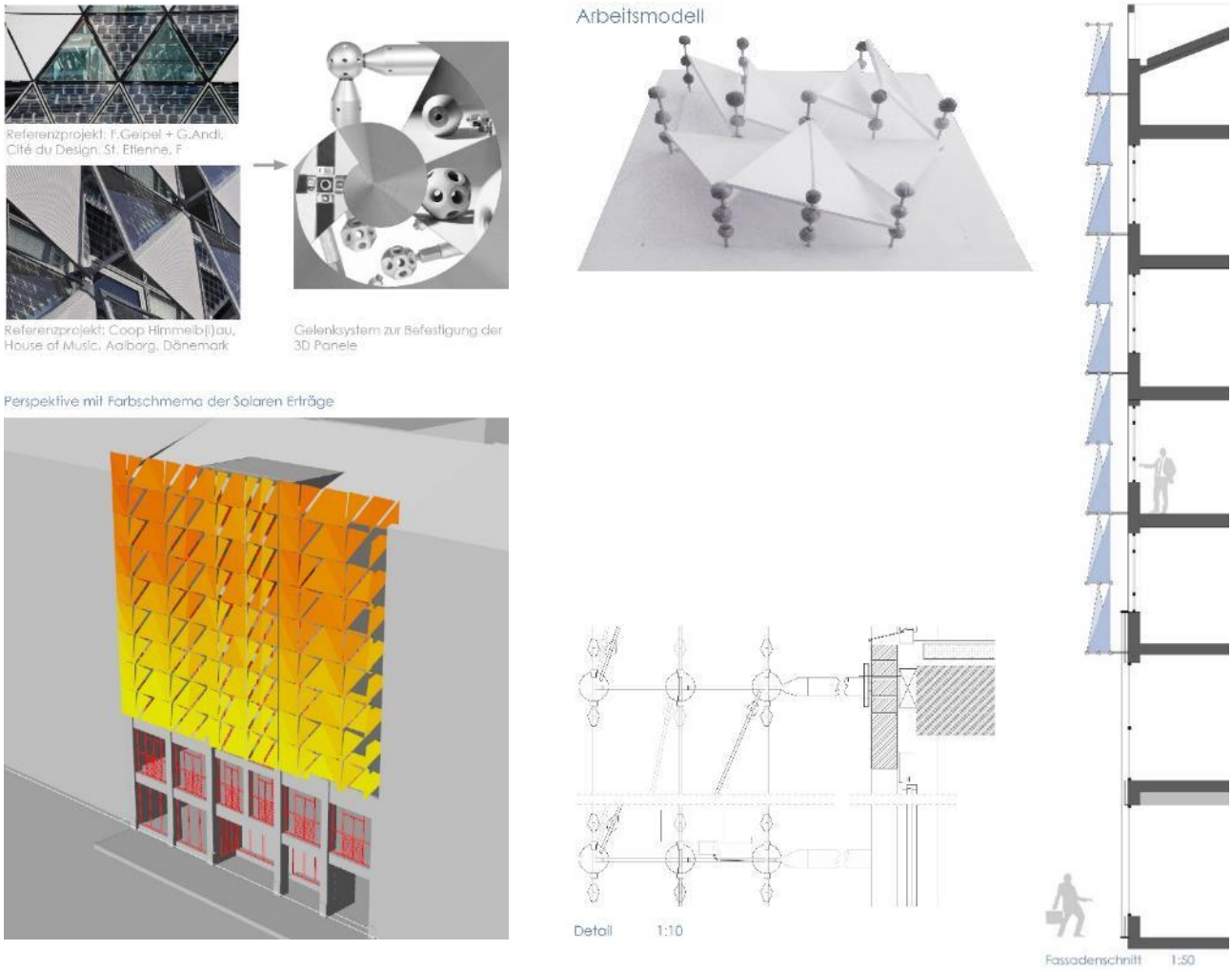


Abb. 23: Studentenentwurf M. Nikovic, L. Schottstädt

Vertikale Lamellen

Der Entwurf thematisiert die vertikale Lamelle als 2. Haut und Sonnenschutz für das Gebäude (vgl. Abb. 24). Der dynamische Parameter für die Optimierung ist hier die Rotation von vorgefertigten Lamellenelementen, die entsprechend der Gebäudeausrichtung jeweils passgenau erfolgen kann.

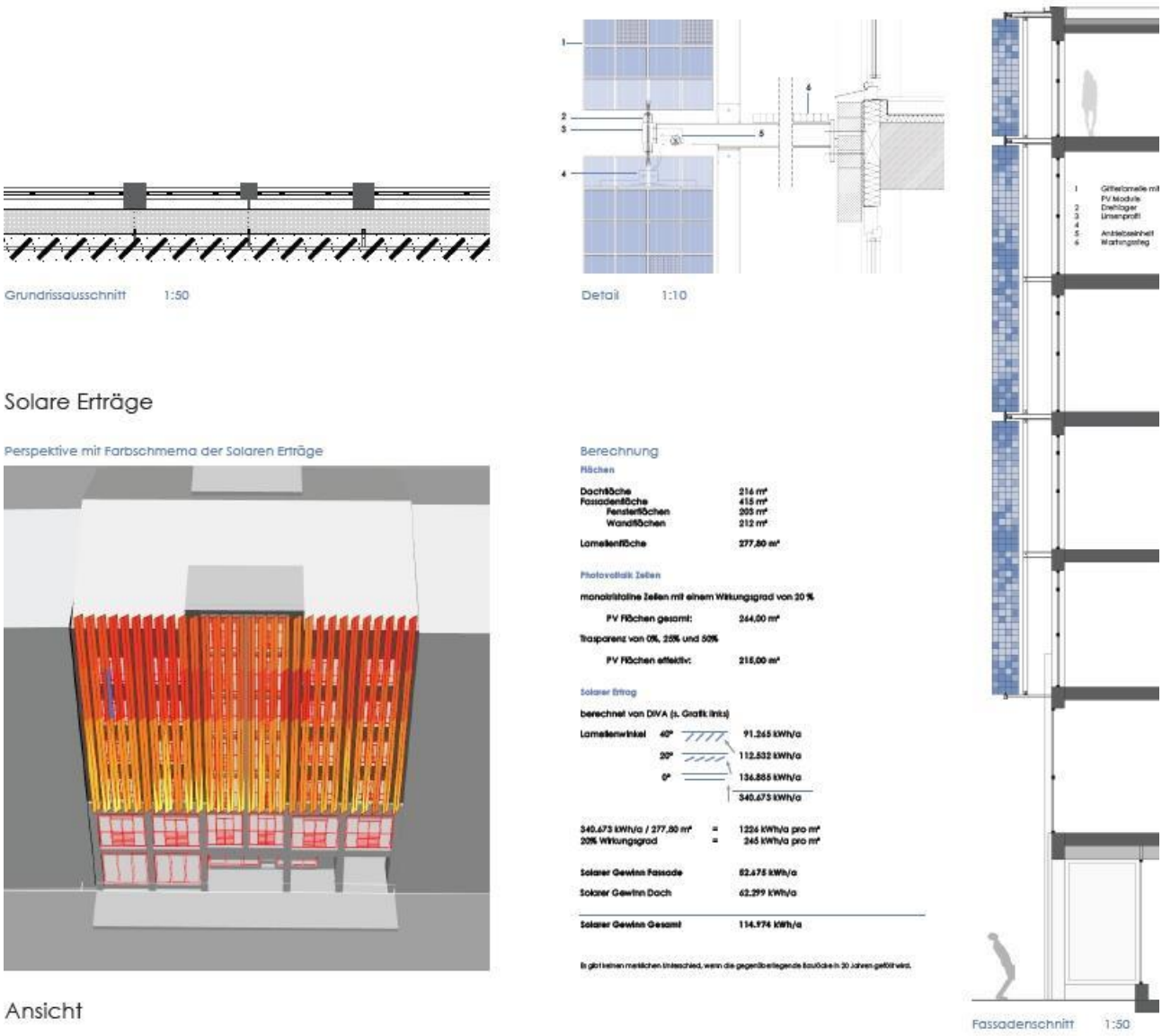


Abb. 24: Studentenentwurf M. Nikovic, L. Schottstädt

Gefaltete Teilflächen

Ausgangspunkt für die geometrische Optimierung der Fassade im ersten Entwurf (vgl. Abb. 25) bilden Pyramiden mit unregelmäßiger dreieckiger Grundfläche. Durch das Verschieben der Spitze in x-, y- und z-Richtung erfolgt die Optimierung der sonnenzugewandten Flächen.

Der zweite Entwurf (vgl. Abb. 26) basiert auf dem Prinzip der Transformation durch Skalierung und Verschiebung der Bergfalten relativ zur Grundfläche, wodurch je nach Auswahl und Rangfolge der Regeln eine hohe Variantenvielfalt ermöglicht wird.

Abb. 25: Studentenentwurf S. Buggenhagen, M. Helbig

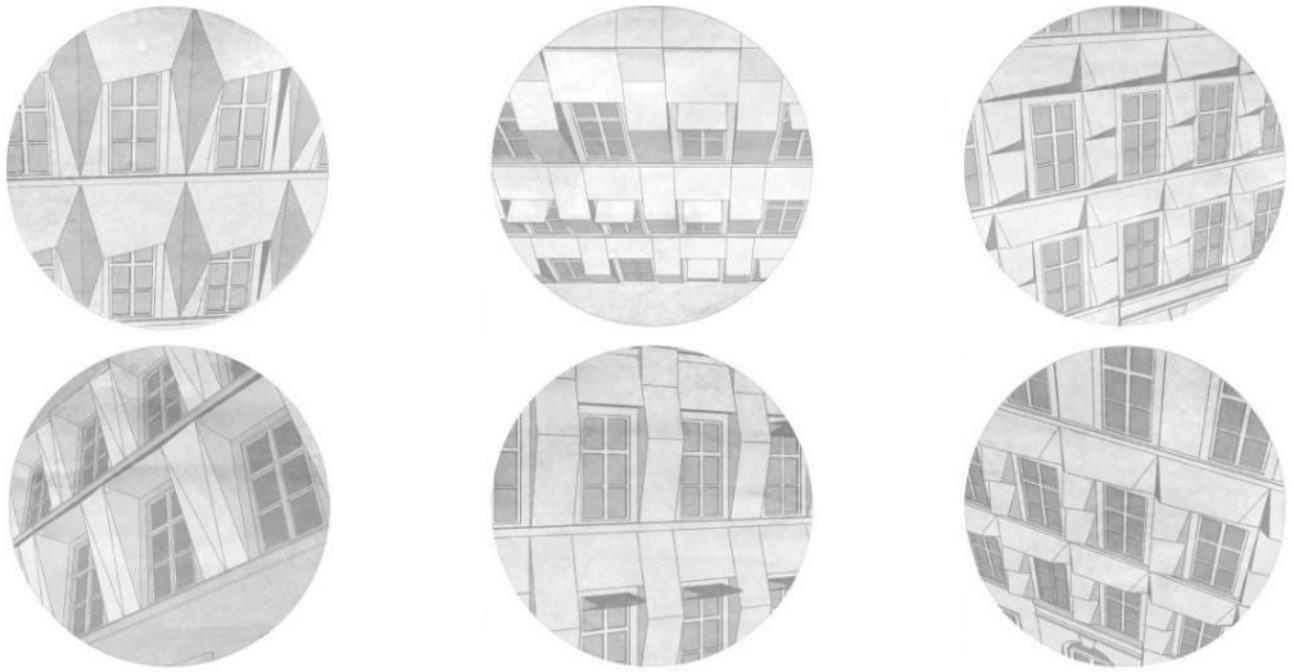
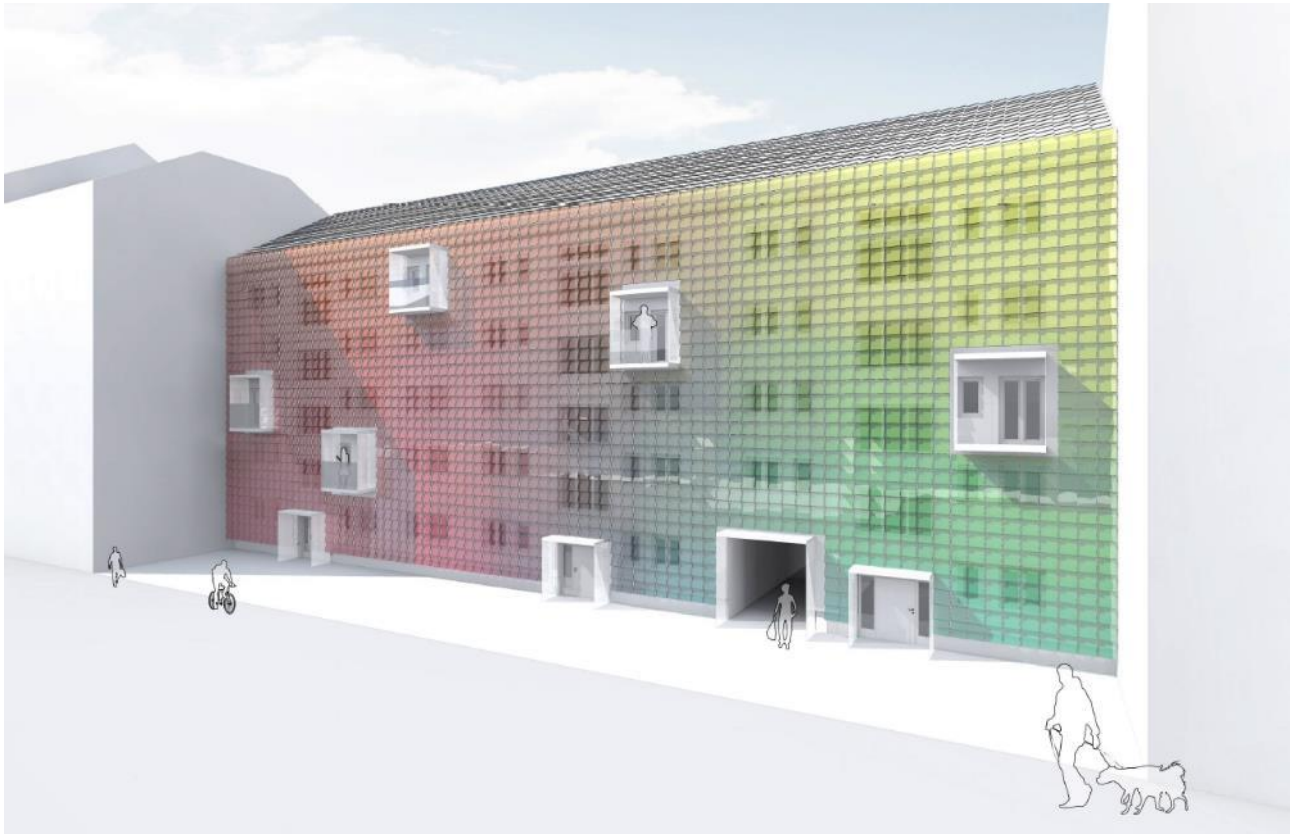
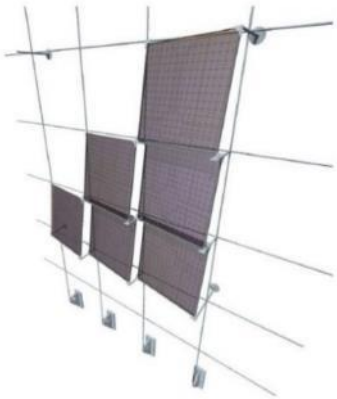


Abb. 26: Studentenentwurf T. Lu, M. Noack

Solare Pixel

Der Entwurf basiert auf einer gleichmäßigen Aufteilung der Hüllfläche in Quadrate (vgl. Abb. 27). Durch das Drehen der durch die Teilung entstandenen Einzelelemente um einen Eckpunkt lösen sich diese entsprechend dem Optimierungsergebnis in unterschiedlichen Winkeln von der planaren Haut. Die Befestigung der Einzelelemente erfolgt mittels Seilsystem und Einhangelementen.





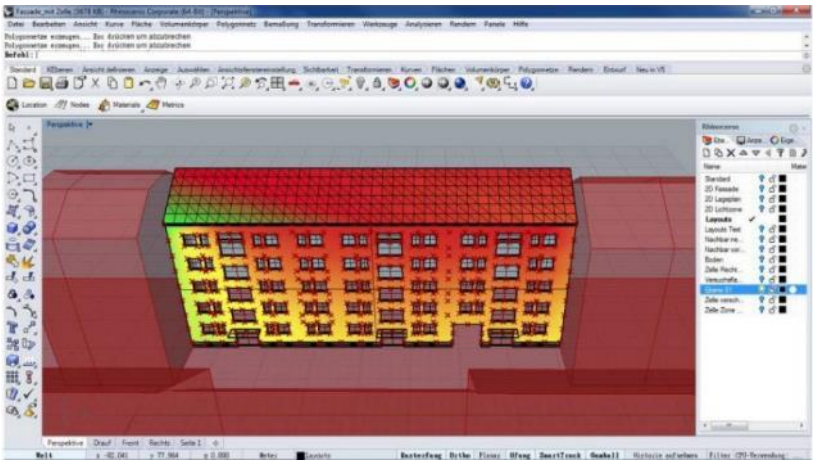


Abb. 27: Studentenentwurf N. Povtareva, I. Iliakov

3.2 Kombinationsmöglichkeiten & Verbindungsarten

Für die Kombination von PV und Fassadenmaterial gibt es verschiedene Herangehensweisen:

- Das PV-Modul fungiert als eigenständiges Fassadenelement
- Die PV-Komponente wird in ein Fassadenelement integriert

Je nach gewünschtem Erscheinungsbild kann die Kombination auf unterschiedliche Weise erfolgen. Strategien sind z. B.:

Anpassung

Diese Integrationsweise zeichnet sich durch die Angleichung von PV und Fassadenmaterial aus. Der Fassade ist nicht mehr „anzusehen", dass PV integriert ist. Die Module erscheinen vielmehr als „normales" Fassadenmaterial und fügen sich in das Erscheinungsbild des Gesamtgebäudes ein.

Bildquelle: www.point-project.net/piktogramme/ pictostock.php?group=0.1.24.3&lang=83&search=&pg=0&picto=40102.7118518519

Dialog

Im Dialog der Materialien werden einzelne Oberflächeneigenschaften von Fassadenmaterial und PV aufeinander abgestimmt, z. B. Farbe, Oberflächenmaterial und/oder Muster. Bei dieser Variante ist der Unterschied zwischen den Materialitäten ersichtlich, jedoch ist die PV weniger präsent.

Bildquelle: clipartfest.com/download/ 9d72af718429689fa348765a6e44ce62b26b12d9.html

Dominanz

In dieser Gestaltungsvariante beherrscht eine Komponente das Fassadenbild, die anderen ordnen sich ihr unter. Dies kann bspw. durch Formgebung, Flächenanteile oder Kontraste erreicht werden.

Bildquelle: www.clipartpanda.com/clipart_images/download-66220145

Eine wichtige Rolle spielen darüber hinaus die Verbindungs- und die Integrationsart der PV-Komponenten. Auch hier gibt es verschiedene Gestaltungsansätze. Abb. 28 zeigt mögliche Kombinationsprinzipien.

Abb. 28: Kombinationsprinzipien von PV und Fassadenmaterial

In Abb. 29 sind nutzbare Verbindungsarten zusammengestellt, wobei zwischen dauerhafter und lösbarer Verbindungsart unterschieden wird. Der Planer wählt diese entsprechend seinem Fassadenkonzept. Auch, wenn einige (z. B. Reiß- oder Klettverschluss) zunächst ungewöhnlich für den Einsatz im Fassadenkontext erscheinen, wurden sie dennoch nicht aus dem Ideenpool ausgeschlossen. Umgesetzt in geeigneten Materialien und in Verbindung mit weiteren Sicherungsmaßnahmen können sie interessante Kombinationsmöglichkeiten für die PV-Fassade sein. Abhängig vom konkreten Fassadendesign, der Auswahl der Fassadenmaterialien und den eingesetzten Zellen sind jeweils unterschiedliche Verbindungsarten vorteilhaft.

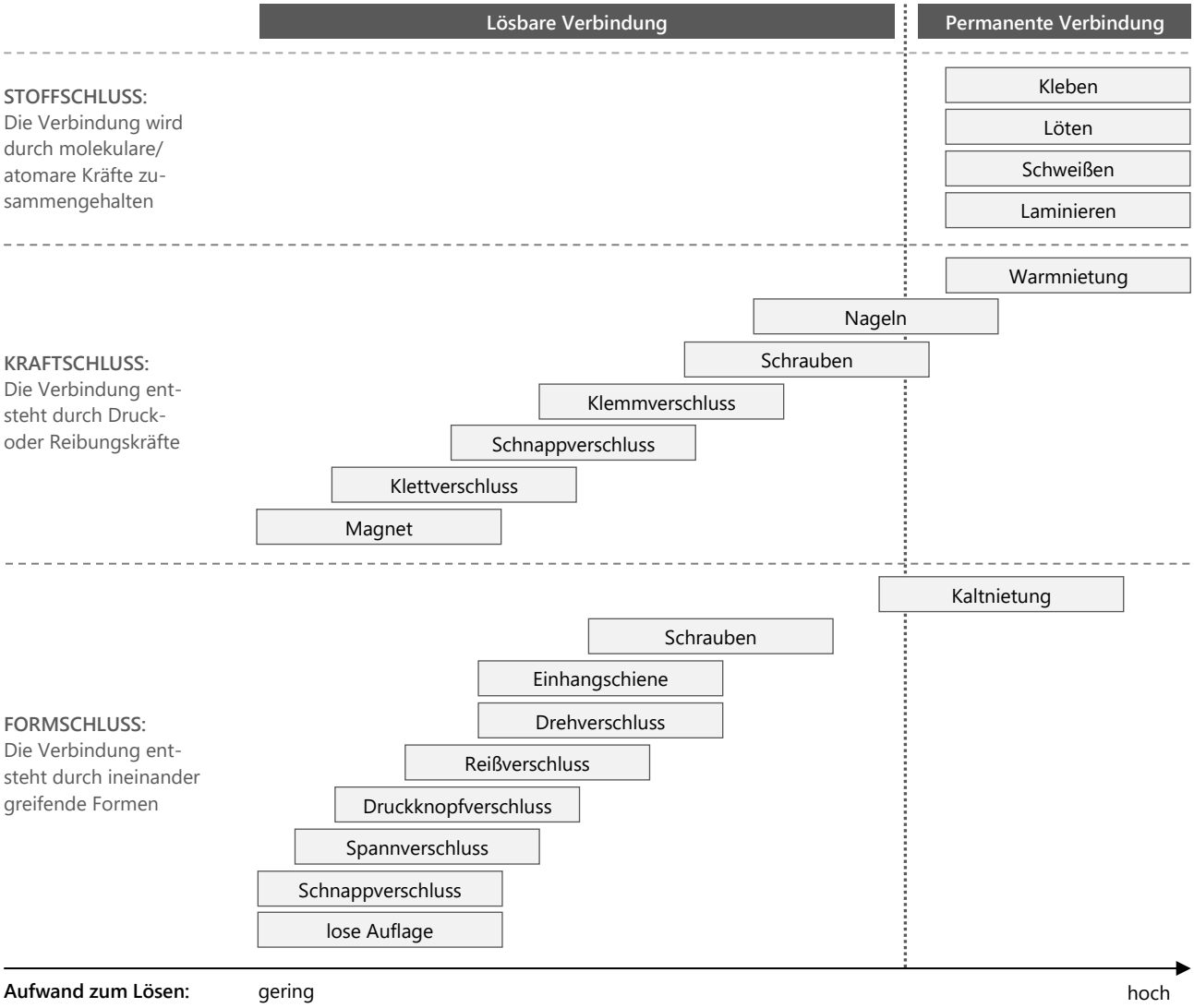


Abb. 29: Verbindungsarten | Auf Grundlage von: (El Khouli, John, & Zeumer, 2014), S. 67

3.3 Kombinationskonzepte

Entsprechend den Untersuchungen zu möglichen Kombinationen von Fassadenmaterialien und -systemen für die BIPV (vgl. 2.4.4 Kombinationspotentiale) wurde die darin eingegrenzte Auswahl - Metall, Ziegel und Beton - hinsichtlich ihrer Kombinationsmöglichkeiten mit PV näher betrachtet:

3.3.1 Metallfassade & Photovoltaik

Metallfassaden werden zumeist als Sandwichsysteme oder vorgehängte hinterlüftete Fassaden ausgeführt. Für eine Integration von PV-Zellen eignen sich vorgehängte hinterlüftete Fassaden hervorragend, da die einzelnen Elemente bei einem Defekt einfacher ausgetauscht werden können und so eine Revisionierbarkeit der PV-Fassade gewährleistet ist. Die Hinterlüftung ist zudem vorteilhaft in Bezug auf den Überhitzungsschutz der PV-Elemente. Die Realisierung von Metallfassaden erfolgt mit Blechen oder Verbundplatten, die als Paneele, Profilbleche oder Kassetten ausgebildet werden können. Für die Kombination von Metallfassade und PV wurden 2 Beispiele betrachtet und deren individuelle Vor- und Nachteile aufgezeigt:

Steckpaneel mit organischer Photovoltaik (OPV)
Da Metallfassaden aufgrund ihrer Materialeigenschaften zu den Leichtbausystemen zählen verfolgte der Ansatz das Ziel, konstant möglichst leichte Komponenten zu verbauen. Das Beispielsystem wurde als vorgehängte hinterlüftete Fassade mit aufgeklebter OPV (leichteste PV-Technologie) konzipiert.
Metall-Fassadenpaneele bestehen in der Regel aus 0,9 - 1,2 mm starken Aluminiumblechen oder 0,5 - 0,75 mm starken Stahlblechen. Die Bleche werden mittels Rollformung durch hintereinander gereihte Walzen oder Rollen geleitet, bis die gewünschte Form erreicht ist. Anschließend wird die OPV, welche mit individuellen Mustern, Farben und Abmessungen hergestellt werden kann, stoffschlüssig auflaminiert oder geklebt. Bei der Fassadenmontage werden die Paneele ineinander gesteckt und mit selbstschneidenden Schrauben an der Unterkonstruktion fixiert. Das Verbindungskabel der OPV wird durch das Blech hinter das Paneel geführt und mit den anderen OPV-Kassetten verschaltet.

Zur Verbesserung der Steifigkeit können in einem Umformverfahren zusätzlich Wölbstrukturen in die Bleche eingebracht werden. Die sechseckigen dreidimensionalen Materialstrukturen werden dabei durch einen Selbstorganisationsprozess erzeugt. Die Wabendurchmesser können dabei von 0,9 mm bis 50 mm variieren. Durch die Materialstruktuierung erhalten 0,9 mm starke Aluminium-Paneele die gleiche Steifigkeit wie 1,2 mm starke unstrukturierte Paneele. Das bedeutet, dass eine Materialeinsparung von 25 % erzielt werden kann. Der Ansatz im Projekt war es, die OPV auf das glatte Blech zu laminieren oder zu kleben und durch den Wölbstrukturierungsprozess mit verformen zu lassen. Dies konnte jedoch im Rahmen des Projektes nicht getestet werden.

Vorteile:
- kostengünstige Variante
- die Herstellung von OPV-Zellen ist im Vergleich zu kristallinen PV-Zellen deutlich energieeffizienter
- OPV und Metallpaneele sind sehr leicht, daher muss die Unterkonstruktion nicht verstärkt werden
- Metallpaneel wird multifunktional als Fassadenbekleidung und OPV-Trägermaterial verwendet
- die Ausrichtung der OPV zur Sonne ist für den Wirkungsgrad der PV-Zelle im Vergleich zu kristallinen PV-Zellen nicht ausschlaggebend
- die Zelltemperatur (z. B. bei starker Besonnung) hat keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad
- die Vorstrukturierung des Bleches versteift die Paneele, sodass durch schlankere Blechdicken Material eingespart werden kann

Nachteile:
- aufwendige Revisionierung: alle Kassetten in der vertikalen Reihe müssen, von unten angefangen, bis zum defekten Element demontiert werden, sodass dieses ausgetauscht werden kann
- Wirkungsgrad der OPV-Zellen liegt bei ca. 4 – 9 % und ist damit wesentlich geringer als der von kristallinen Photovoltaikzellen (Wirkungsgrad 15 – 20 %)
- geringere Lebensdauer der Zellen im Vergleich zu kristallinen Zellen

Aluminiumverbundplatten mit kristalliner Photovoltaik

Aluminiumverbundplatten haben eine Dicke von 3 - 4 mm und bestehen aus zwei Aluminium-Deckschichten (je 0,5 mm) und einem Kern aus mineralischem Füllstoff mit polymerem Bindemittel (nicht brennbar) oder mineralischem Polymer (schwer entflammbar). Der Vorteil von Aluminiumverbundplatten ist, dass die Rückseite der Platte eingefräst und die Platte im gewünschten Winkel gefaltet werden kann. Durch das Vorsehen von Aussparungen und Befestigungslaschen im Material lassen sich kristalline PV-Module oberflächenbündig integrieren. Durch das Vorsehen von nach hinten gefalteten Verbindungslaschen, die durch Nieten und Platten miteinander verbunden werden, werden die 3D-Struktur und die Elementsteifigkeit gesichert. Durch die Verwendung CNC-gestützter Fertigungsmethoden lassen sich auch komplexe Strukturen herstellen. Die gefalteten Verbundplatten können ebenfalls mit konventionellen Befestigungsmitteln und Unterkonstruktionssystemen als vorgehängte hinterlüftete Fassade am Gebäude montiert werden. Das Material weist deshalb viel Potential auf, um solar optimierte 3D-Fassaden umzusetzen.

Vorteile:
- die integrierte PV kann durch Faltungen optimal zur Sonne ausgerichtet werden
- eine millimetergenaue Umsetzung der Faltungen ist möglich
- keine zusätzlichen Aussteifungskomponenten notwendig
- durch Beschichtung der Metallplatten sind Farbe und Glanzgrad veränderbar

Nachteile:
- eine Revisionierungsmöglichkeit kann umgesetzt werden, muss jedoch speziell entwickelt werden
- Runde Formen lassen sich nur schwer realisieren
- Zweidimensionales Umformen (Krümmen) ist nicht möglich

3.3.2 Ziegelfassade & Photovoltaik

Ausgangspunkt des Ansatzes ist die Kombination von (Form)ziegeln mit kristallinen PV-Kleinmodulen. Vorteilhaft am Material Ziegel ist, dass sich individuelle Formsteine herstellen lassen, die nach Bedarf Aussparungen für die PV-Module besitzen und entsprechend den Ausrichtungsanforderungen formbar sind. Mauerwerk kann durch die Kleinteiligkeit der einzelnen Steine zu jeglicher 3D-Freiform zusammengesetzt werden, sogar Fassadenrundungen sind möglich.
Das Kombinationskonzept sieht die Verwendung von Glas-Folie- bzw. Glas-Glas-PV-Modulen vor, die in Ziegelaussparungen flächenbündig eingesetzt werden. Als vorgesetztes Verblendmauerwerk kann die Fassade mit Konsolenankern an der Außenwand befestigt werden. Die PV-Anschlusskabel werden im Inneren der Ziegel verzogen und rückseitig verschaltet. Zur Revisionierung defekter PV-Module müssen diese aus dem Stein herausnehmbar sein. Dies könnte z. B. mittels einer Klickverbindung realisiert werden.

Vorteile:
- Ziegel sind ein weltweit verbreitetes und viel verbautes Material, wodurch PV-Ziegel-Lösungen ein potentiell großes Einsatzfeld besitzen
- die Kleinteiligkeit des Ziegels erhöht die Flexibilität der Fassadengestaltung
- Dreidimensional geformte Fassaden können realisiert werden
- die Ziegel können in nahezu jeder Form hergestellt werden
- durch verschiedene Bearbeitungsmethoden sind Farbe, Struktur und Glanzgrad des Ziegels veränderbar

Nachteile:
- Durch die Kleinteiligkeit erhöhen sich der Herstellungs- und Verkabelungsaufwand deutlich
- die Revisionierung der PV-Kleinmodule ist sehr aufwendig

3.3.3 Sichtbetonfassade & Photovoltaik

Bei der Kombination von PV und Beton können interessante BIPV-Fassaden entstehen, da der Werkstoff nahezu frei formbar ist und seine Oberfläche eingefärbt bzw. nachbehandelt werden kann. Zudem bietet er die Möglichkeit, sowohl kleinteilige als auch großflächige Elemente auszuformen, in die PV-Module z. B. durch Ein- oder Aufsetzen integriert werden. Die Beton-Fassadenelemente können dann durch ein Agraffensystem (rückseitige, nicht sichtbare Befestigung) als vorgehängte, hinterlüftete Fassade oder als Sandwichelemente am Gebäude montiert werden.
Beton eignet sich besonders dafür, Formen und Aussparungen bereits mit der Schalung vorzusehen, sodass eine oberflächenbündige Integration der PV ermöglicht wird. Auch Befestigungselemente (z. B. Schienen oder Schraubgewinde) können bereits bei der Betonage integriert werden. Nach dem Ausschalen können die PV-Module durch Verklebung stoffschlüssig oder durch Schraub- oder Klickverbindungen formschlüssig integriert werden. Der Vorteil der zweiten variante liegt in der Revisionierbarkeit der PV. Zum Einsatz kommen in der Kombination mit Beton vorzugsweise kristalline Glas-Glas- oder Glas-Folie-Module. Es muss beachtet werden, dass es an der Grenzfläche zwischen PV und Beton zu chemischen Reaktionen kommen kann.

Vorteile:
- freie Formbarkeit des Fassadenelements
- Aussparungen und Befestigungen für PV können bereits bei der Betonage vorgesehen werden
- Durch Verwendung neuer Betontechnologien (z. B. Textilbeton) können schlanke Elemente hergestellt werden
- bei Beton besteht die Möglichkeit, große vorgefertigte Fassadenelemente mit integrierter PV in den Abmaßen bis 6 x 3 m herzustellen und die PV bereits werksseitig zu verschalten

Nachteile:
- mögliche chemische Reaktionen zwischen Beton und PV-Element müssen beachtet werden
- aufwändiger Schalungsaufwand bei komplexeren Formen

3.4 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

PV-Module können auf unterschiedliche Weise mit Fassadenmaterialien kombiniert werden, indem sie z. B. in diese eingeschraubt, auflaminiert oder eingeklebt werden. Hinsichtlich des gestalterischen Zusammenspiels der Komponenten können je nach Entwurfshaltung und -ziel verschiedene Strategien verfolgt werden, die die integrierte PV betonen oder auch im Gesamtfassadenbild verschwinden lassen.
Im Projekt wurden drei Material-PV-Kombinationen exemplarisch untersucht und bewertet. Zusammen mit Geometriestudien zu verschiedenen Möglichkeiten, zweidimensionale Flächen in dreidimensionale Strukturen umzusetzen, bildeten sie die Grundlage für Entwurfsansätze solar ausgerichteter Gebäudehüllen. Erste kleinmaßstäbliche Berechnungen der zu erwartenden solaren Erträge zeigten, dass diese bei Ausrichtung zur Sonne deutlich ansteigen und damit eine im Vergleich zu einer vertikalen Einbausituation effektivere Ausnutzung der PV-Module gegeben ist. Durch dreidimensionale Formgebung der Fassade reduziert sich die Fläche, die effektiv mit PV belegt werden kann. Jedoch wird die PV in der optimierten Fassade zum einen effizienter ausgenutzt, zum anderen bleiben Materialität und Erscheinungsbild des eigentlichen Fassadenmaterials erhalten. Je nach gewünschtem Erscheinungsbild kann mit der PV „gespielt" und diese sowohl in größeren Flächen als auch kleinteilig in die Fassade integriert werden.
Möglicherweise reicht bereits der veränderte Blickwinkel, PV und Fassade als integrales Ganzes und nicht länger als „Kontrahenten" zu sehen aus, um eine neue Design-Vielfalt in der BIPV zu erreichen. Entsteht damit der Bedarf an neuen individuelleren PV-Lösungen seitens der Bauherren und Planer, wird ihm die Industrie über kurz oder lang nachkommen.

4 Lösungsvarianten und Bewertung

4.1 Strategie parametrisch-generativer Optimierung am Beispiel einer gefalteten Fassade

Nachfolgend werden am Beispiel von in Metallfassadenelementen integrierten PV-Lamellen Strategien und Prinzipien der parametrisch-generativen Optimierung beschrieben. Abb. 30 zeigt in einer Grasshopper-Definition das Zusammenspiel von Geometrie-, Analyse- und Optimierungs-Algorithmen.

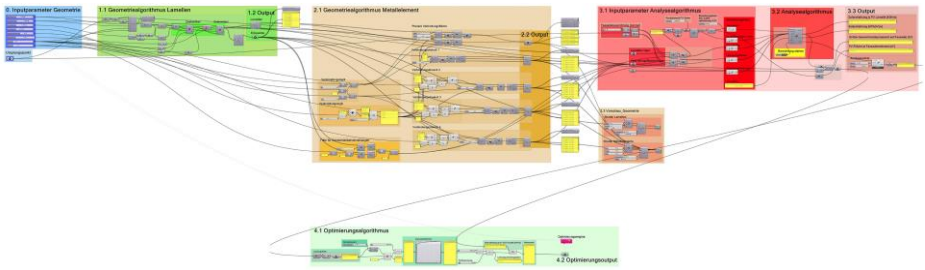


Abb. 30: Gesamtübersicht der Geometrie-, Analyse- und Optimierungs-Algorithmen im Grasshopper für Rhino 5

Input-Parameter Gesamtgeometrie

Um dem Geometrie-Algorithmus, zur Erzeugung der Fassade, eine maximale Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Rahmenbedingungen zu ermöglichen, wurden folgende veränderliche Parameter als Input definiert:

- Modulhöhe (mh) & -breite (mb)
- Lamellenlänge (ll) & -breite (lb)
- Lamellen-Rotationswinkel (rw) & -Kippwinkel (kw)

Der Input-Parameter „Ursprungspunkt" gibt der durch den Geometrie-Algorithmus aufzubauenden Geometrie darüber hinaus eine klar definierte Startposition im kartesischen Koordinatensystem mit X-,Y- und Z-Koordinate (vgl. Abb. 31).

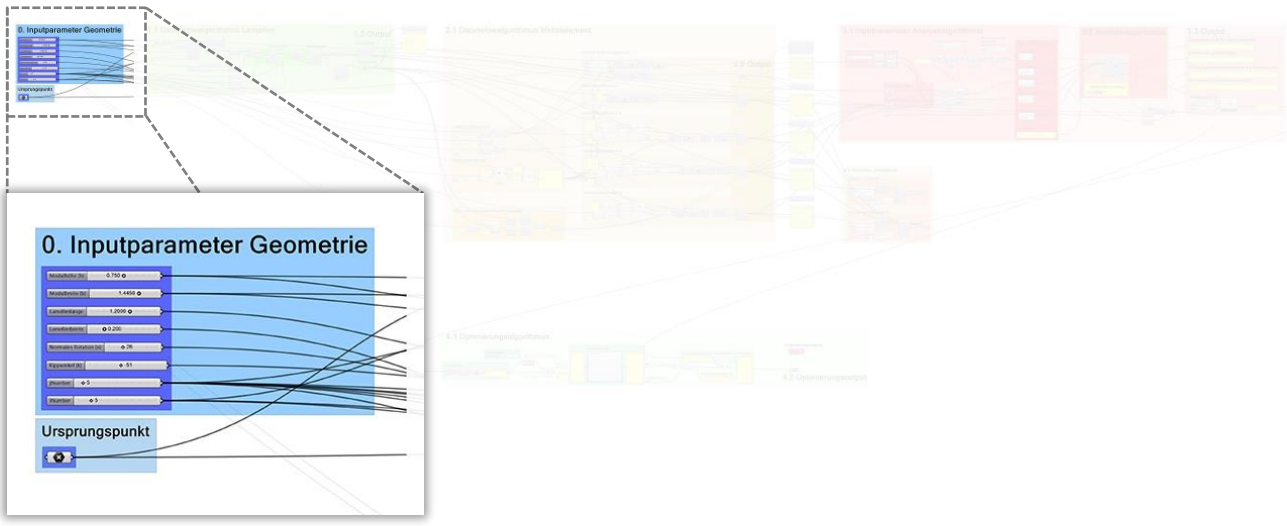


Abb. 31: Inputparameter

Geometrie-Algorithmus Lamelle

Der Geometrie-Algorithmus der PV-Lamelle (vgl. Abb. 32) erzeugt zunächst ein definiertes Grundraster (Fassadenraster). Im definierten Anwendungsfall wurde das Grundraster mit 1,50 m in der Horizontalen und 0,75 m (Teiler von 3 m, entspricht Geschosshöhe) in der Vertikalen angelegt. Dieses Raster stellt sicher, dass die aus 7 polykristallinen Standard-PV-Zellen zusammengesetzte PV-Lamelle in den Maßen 1,16 m x 0,2 m (vgl. Abb. 33) genug Raum für eine solar optimierte Ausrichtung erhält und gleichzeitig eine angemessene Dichte auf der Gesamtfassade erzielt werden kann.

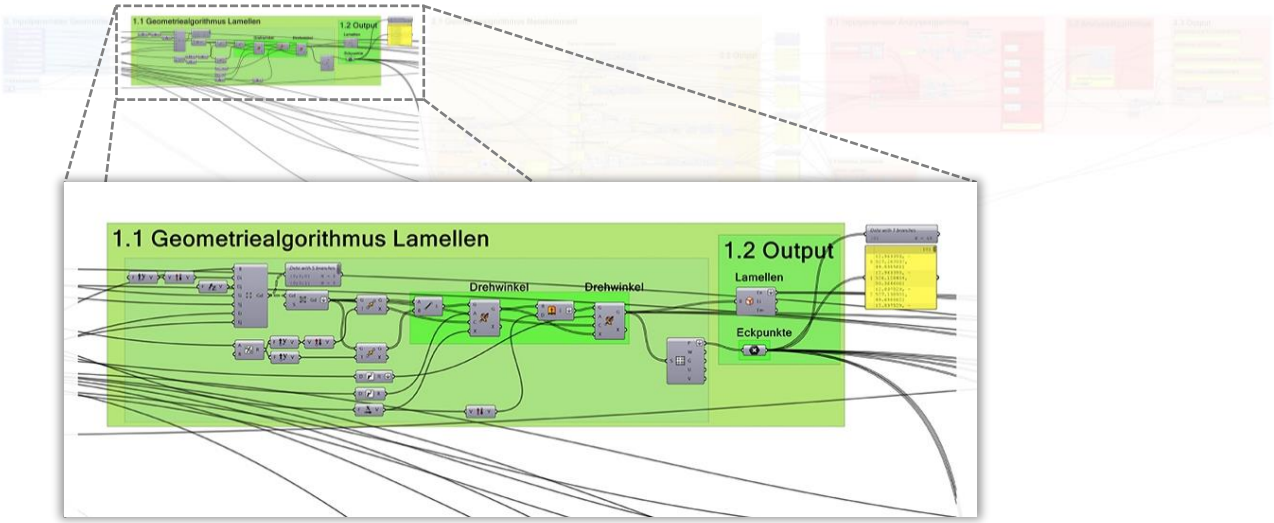


Abb. 32: Geometrie-Algorithmus der Lamellen

Die Lamellengeometrie lässt sich über zwei sog. „Number Slider" (ganzzahlige Schieberegler) in ihrer Ausrichtung zum Grundraster verändern. Die „Number Slider" liefern im Rahmen von zuvor festgelegten Ober- und Untergrenzen beliebig einstellbare Gradwerte, welche, verknüpft mit einem Rotationsbefehl, für eine Veränderung der räumlichen Ausrichtung der Geometrien sorgen. Hierfür wird eine Längskante der Lamelle als Referenzkante ausgewählt, die in jeder durch eine Optimierung veränderten Ausrichtung planar zur Fassadenfläche (Grundraster) bleibt. Diese Kante fungiert als Kippachse des Elementes und lässt es im Bereich von 0° bis 90° kippen. Das Kippen ist der erste Freiheitsgrad der Lamelle. Wird der Mittelpunkt dieser Kante linear in Normalenrichtung der Fassadenfläche verlängert, erhält man eine Rotationsachse und somit den zweiten Freiheitsgrad der Lamelle. Die Rotation ist ebenfalls im Bereich von 0° bis 90° über die „Number Slider" einstellbar. Es lassen sich damit alle, für eine Optimierung im Sinne der maximalen solaren Einstrahlung, relevanten Ausrichtungen abbilden (vgl. Abb. 34).

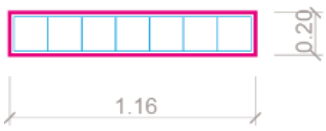


Abb. 33: Größe der PV-Lamelle

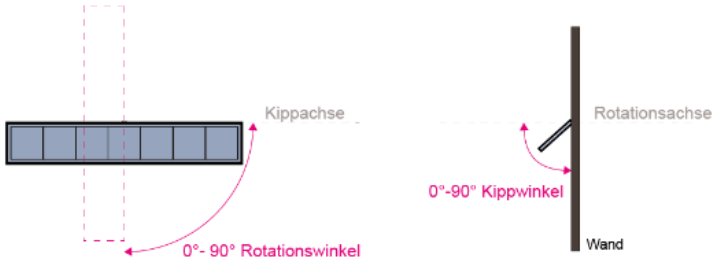


Abb. 34: Freiheitsgrade der PV-Lamelle

Um nicht nur eine einzelne, sondern alle Lamellen in den Optimierungsprozess einbinden zu können und Rückschlüsse über Auswirkungen auf Nachbarlamellen (Verschattung etc.) zu erhalten, wird durch den Algorithmus - ausgehend von den Mittelpunkten der rechteckigen Zellen des Grundrasters von 4 x 4 Zellen - je eine sich synchron mit den anderen Lamellen veränderbare Lamelle erzeugt (Abb. 35). Als Output werden alle erzeugten Lamellen mit ihren Randkurven und die entsprechenden Lamelleneckpunkte zur Weiterverarbeitung im Geometrie-Algorithmus für die Metallumkleidungselemente ausgegeben.

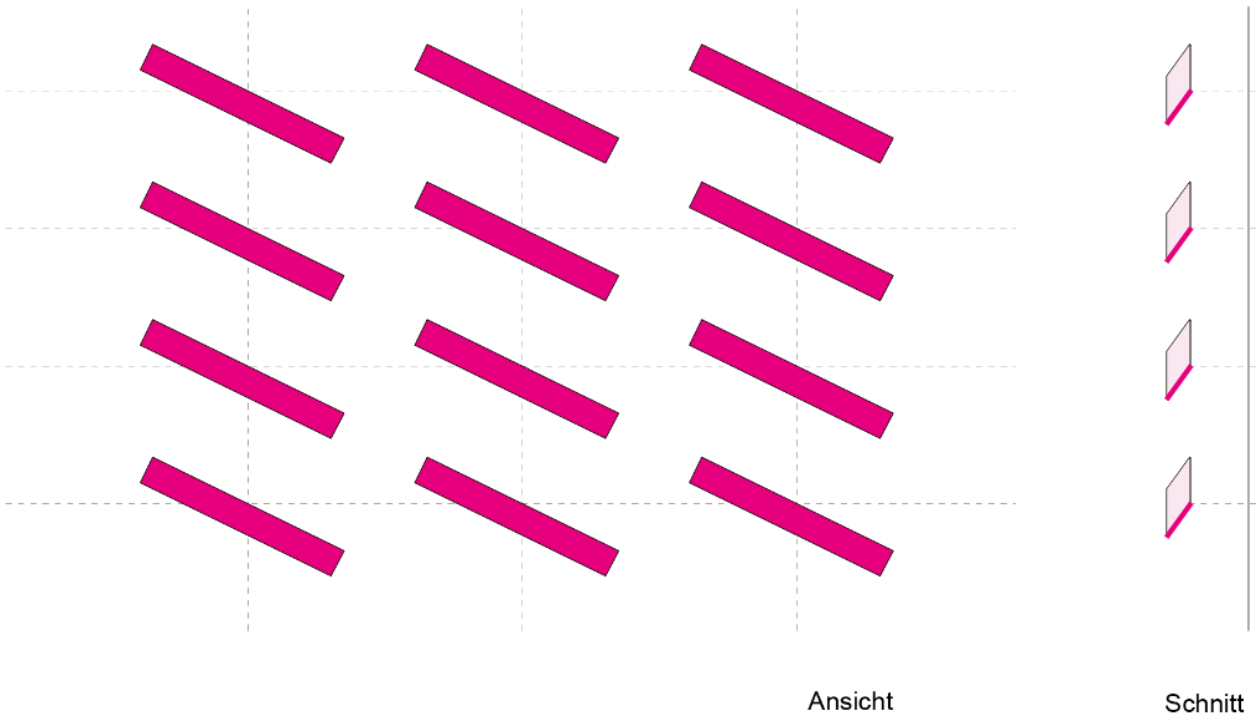


Abb. 35: optimiert ausgerichtete Lamellen

Geometrie-Algorithmus Metallelemente

Der Geometrie-Algorithmus für die Metallelemente (vgl. Abb. 36), in welche die ausgerichteten PV-Lamellen zur Erhaltung ihrer räumlich optimierten Position eingebracht werden, besteht aus zwei Teilen. Der erste ist die Verbindungslogik, welche auf Grundlage der Eckpunkte, mit ihren jeweils spezifischen Indices, aus dem Geometrie-Algorithmus der Lamelle definiert, wie diese zu planaren Flächen und Dreiecken verbunden werden können (vgl. Abb. 37). Im zweiten Teil, dem sog. Überlagerungsfilter, wird die aus der Verbindungslogik entwickelte Geometrie auf Flächenüberlagerungen, welche durch Rotieren und Kippen der Lamellen entstehen können, überprüft und im Falle einer Kollision aus der Datenweiterleitung ausgenommen, um den späteren Optimierungsprozess zu beschleunigen.

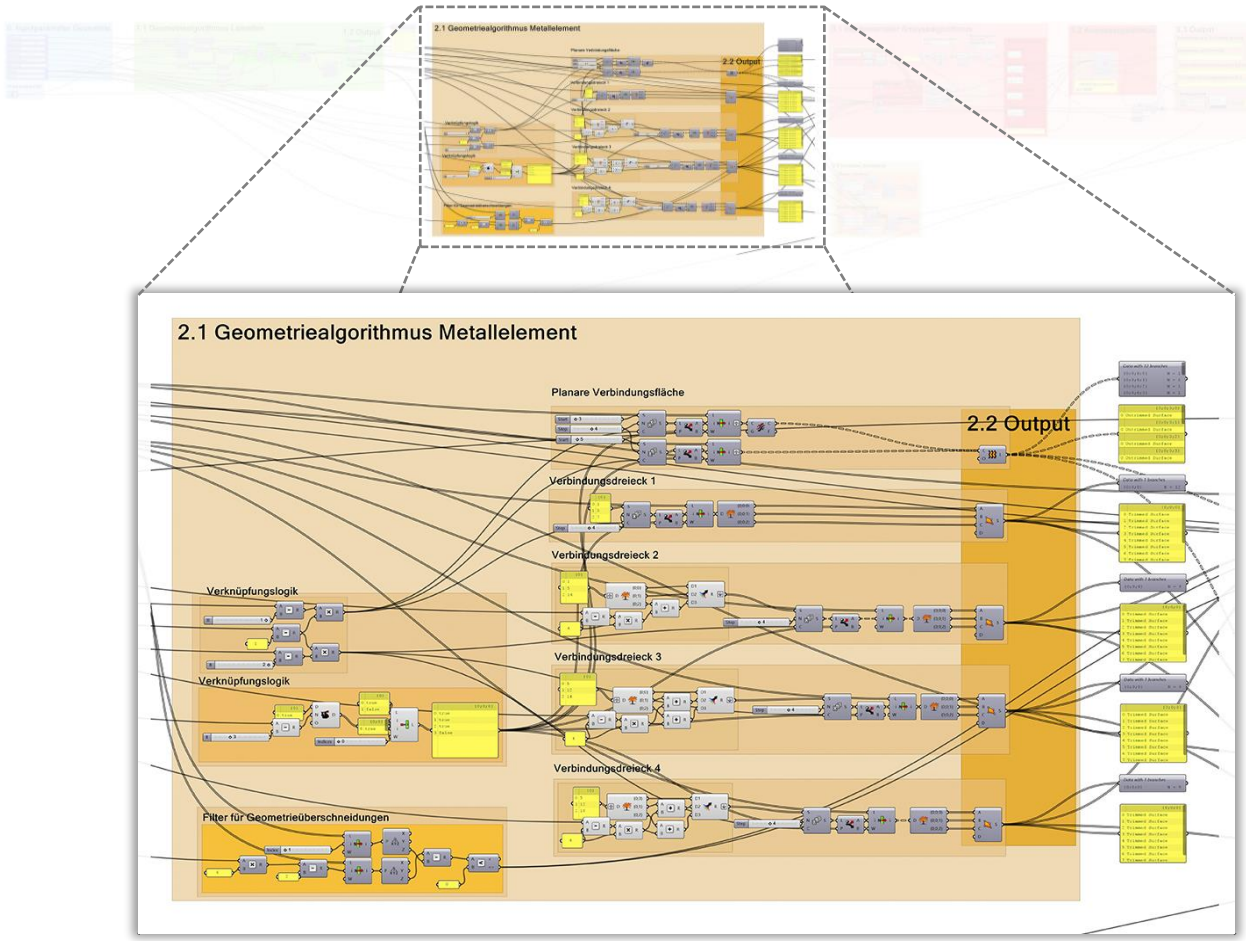


Abb. 36: Geometrie-Algorithmus für die Metallelemente

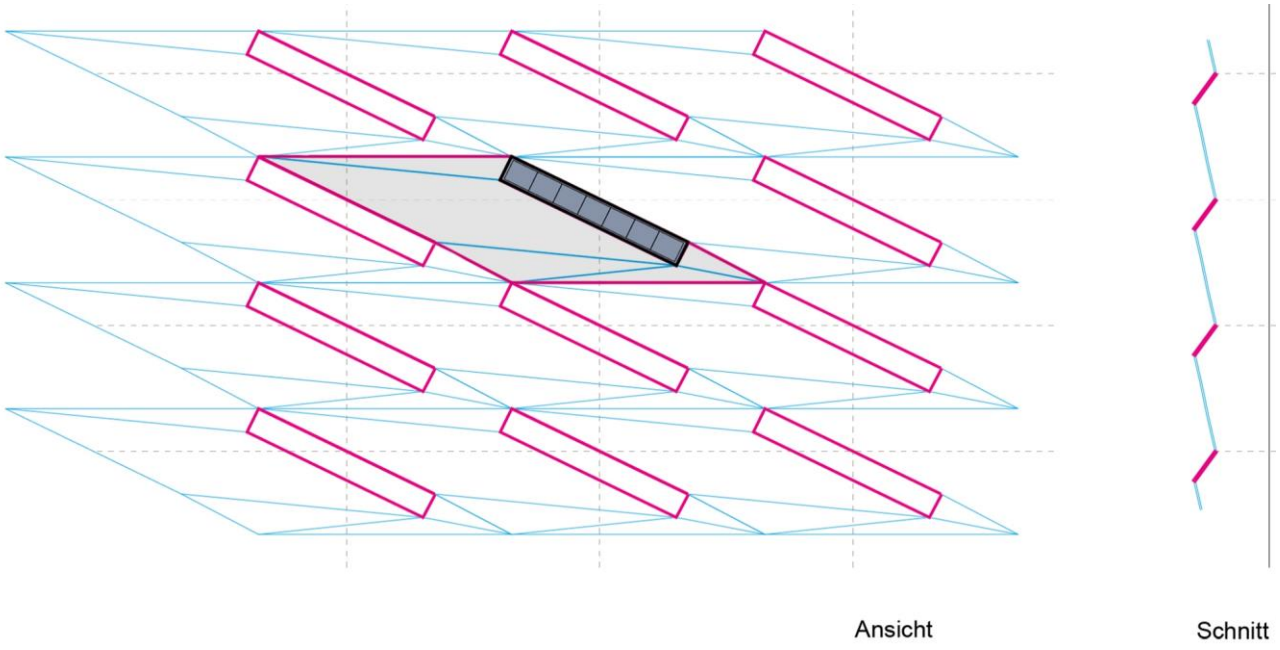


Abb. 37: Erzeugung der Verbindungsflächen zwischen den Lamellen mit hervorgehebenem Einzel-Fassadenelement

Als Ergebnis aus Geometrie-Algorithmus von Lamellen und Metallhüllelementen entsteht ein komplettes, in Echtzeit parametrisch veränderbares, Modell der Gesamtfassade (vgl. Abb. 38).
Der Output zur Weiterverarbeitung im Analyse-Algorithmus beinhaltet alle in ihrer räumlichen Lage und Flächennormalen-Richtung definierten, planaren und mit Indices versehenen Verbindungsflächen, die sich aus der zuvor eingestellten Parameterkombination ergeben können.

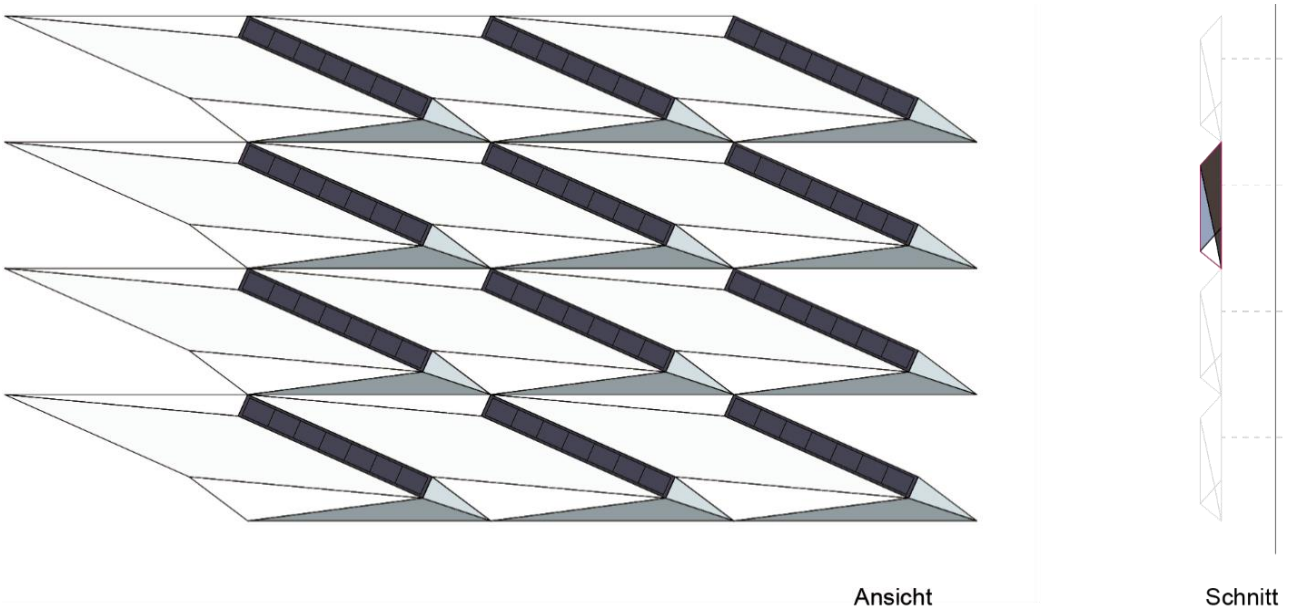


Abb. 38: Resultierende Fassadenflächen

Analyse-Algorithmus für die solare Einstrahlung

Die dynamischen Geometrie-Outputs aus den Algorithmen zur Erzeugung der Lamellen und der Umkleidungsflächen dienen als Grundlagenmodell für die Analyse (vgl. Abb. 40), welches auch über einen weiteren „Number Slider" in Ausrichtung und Azimutwinkel verändert werden kann. So ist eine geometrische Transformationsuntersuchung im Zusammenhang mit einer solaren Optimierung der Fassaden von einer Südausrichtung bis zu einer Westausrichtung in 10° Schritten vorgesehen. Die Fassade befindet sich in einem urbanen Kontext, wie er in Großstädten (z. B. Berlin) zu finden ist. Das Umgebungsmodell wurde dafür digital nachmodelliert (vgl. Abb. 39) und als statischer Geometrie-Input in die Simulation einbezogen.

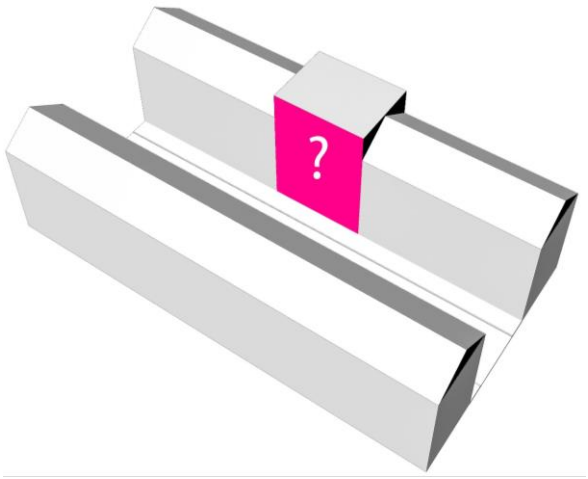


Abb. 39: digitales Umgebungsmodell

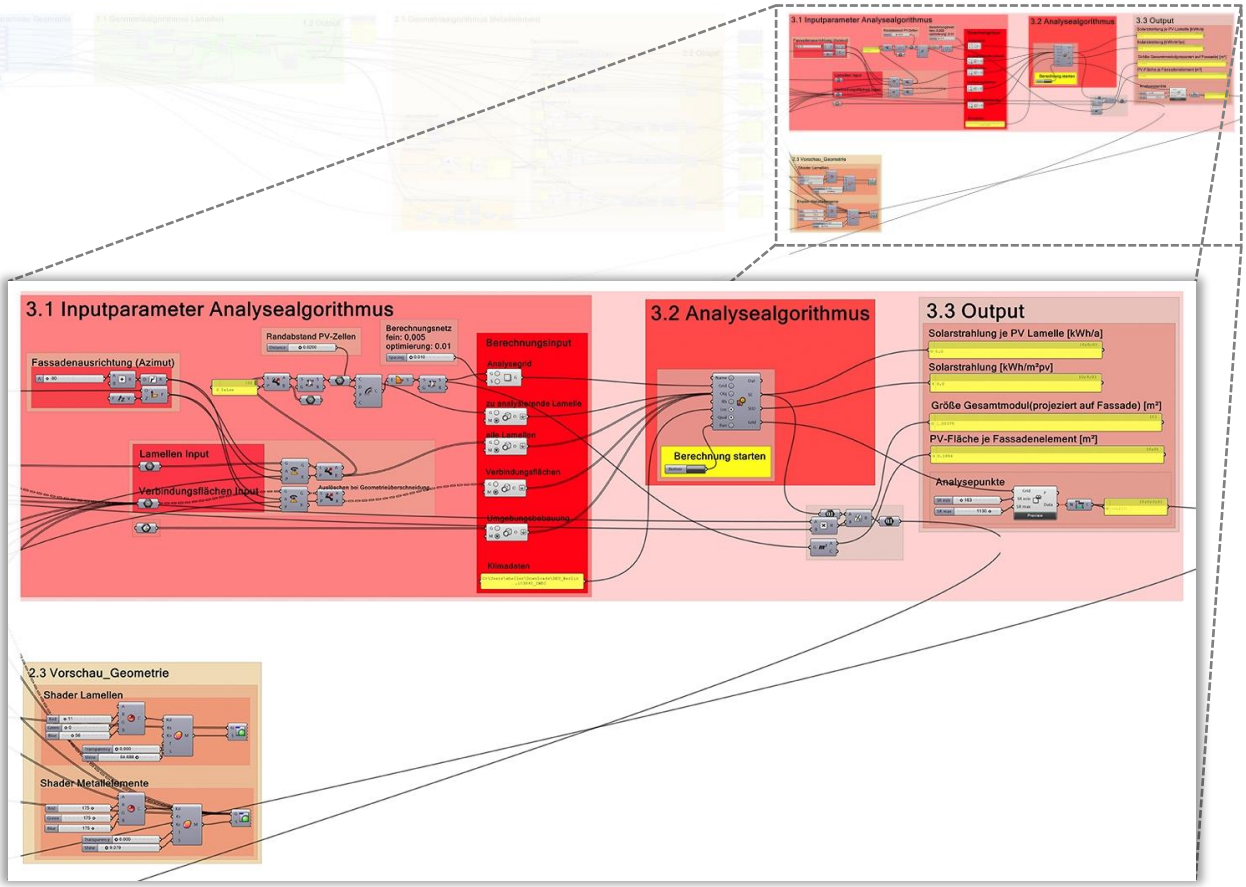


Abb. 40: Analyse-Algorithmus

Um in der Berechnung der solaren Einstrahlung auf die PV-aktiven Flächen realistische Simulationswerte zu erhalten, müssen alle relevanten Geometrien mit entsprechenden Materialeigenschaften (Lichtreflektion, Transmission etc.) verknüpft werden. Die Kontextbebauung wurde mit einem Standardmaterial versehen (OutsideFacade_30). Für die Metallhüllflächen wurde mit Hilfe eines Datenblattes der Aluminumkomposit-Fassade „Champagne Metallic 503“ von Alucobond eine Materialdatei angelegt, die mit der Analyse-Engine kompatibel ist:

```
void metal AlucobondChampagne_45
0
0
5 0.45 0.45 0.45 0.48 0.15
```

Für die PV-Lamelle wurde ein Standard-Glasmaterial entsprechend der Angaben eines Solarmodulherstellers bzgl. der Transmissionsgrade modifiziert:

```
void glass PVlamella_91
0
0
3 0.99097 0.99097 0.99097
```

Darüber hinaus muss ein durch Längen- und Breitengrad definierter Ort mit entsprechenden Wetterdaten (Sonnenstände, solare Einstrahlung etc.) hinterlegt werden. In der durchgeführten Berechnung wurde dafür ein Wetterdatensatz für Berlin aus dem IWEC (International Weather for Energy Calculation) genutzt.
Für die Berechnung wurde eine Lamelle bestimmt, welche sich mittig in der Fassade befindet (vgl. Abb. 41). Dadurch ist gewährleistet, dass Verschattungs- und Reflektionseffekte in vollem Umfang berücksichtigt werden können. Da die zu analysierende Lamelle aufgrund von technischen Anforderungen einen Randbereich einzuhalten hat, wurde das Berechnungsnetz mit einem inneren Versatz von 2 cm definiert. Um möglichst präzise Simulationsergebnisse bei ausreichender Geschwindigkeit für einen generativen Prozess zu erreichen, wurde die Auflösung der Sensorpunkte mit einem Abstand von 1 cm festgelegt. Für eine finale Berechnung der Einstrahlungswerte mit bereits generativ optimierten Parametern für Rotations- und Kippwinkel der Lamelle wurde die Auflösung nochmals auf 0,5 mm verfeinert.
Alle genannten Parameter wurden im Anschluss in der Analyse-Engine der Software „DIVA" gesammelt und mit Hilfe des von Robinson und Stone entwickelten „GenCumulativeSky"-Moduls verarbeitet: Grundsätzlich stehen vier Qualitätsstufen für die Berechnung zur Auswahl. Da es sich um eine komplexe Fassade mit Reflektions- und Schattenwirkungen handelt, wurde die höchste Stufe gewählt, sie kann die volle Tiefe der Licht-Interreflexion simulieren. Folgende Strahlungs-Parameter wurden in der Simulation gesetzt: ab 7 (ambient bounces) - ad 4096 (ambient divisions) - ar 512 (ambient resolution) - as 1024 (ambient supersamples) - aa 0,1 (ambient accuracy) - lw 0,001 (limit weight).
Als Output wird u. a. die solare Einstrahlung je PV-Lamelle in kWh/a, die Solarstrahlung je m^2 PV-Fläche in kWh/(m^2_{pv}*a) sowie die Einstrahlwerte der Sensorpunkte ausgegeben. Die Einzelausgabe an den Sensorpunkten gibt darüber hinaus Auskunft über die Strahlungsverteilung auf der Lamelle. Da für diese vorrangig monokristalline Hochleistungs-Zellen zum Einsatz kommen, welche im Fall von Eigenverschattung nur noch mäßige Erträge liefern, ist das Leistungsdelta (Differenz zwischen Bereichen mit hohen und niedrigeren Einstrahlwerten) in der Ausrichtungsoptimierung möglichst gering zu halten. Alle Simulationsdaten lassen sich mittels der „Grid Preview"-Option in einer sog. Falschfarben Darstellung visualisieren (vgl. Abb. 42).

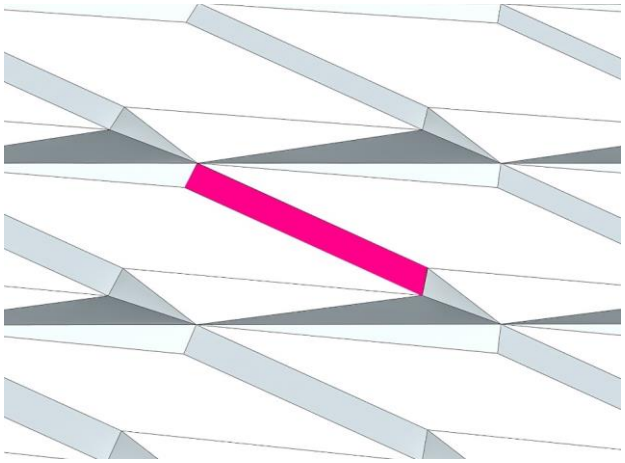


Abb. 41: mittig eingebettete PV-Lamelle

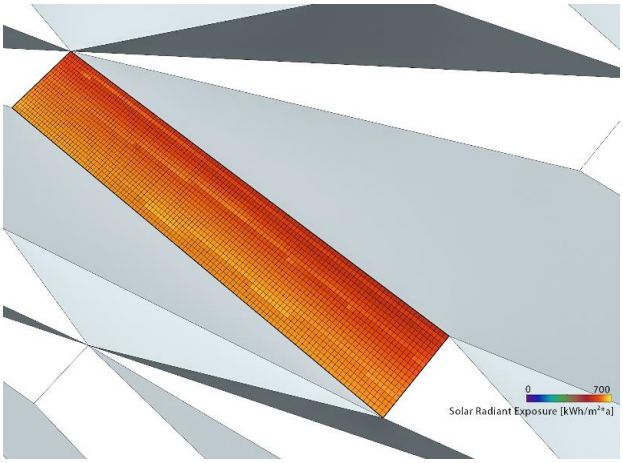


Abb. 42: Falschfarbendarstellung der Einstrahlungsberechnung

Optimierungs-Algorithmus

Um das zuvor beschriebene System aus Geometrie- und Analyse-Algorithmen in einen generativen Prozess zu überführen, wird ein Optimierungs-Algorithmus benötigt (vgl. Abb. 43). Hierfür kommt der „Galapagos Evolutionary Solver“ (by David Rutten) zum Einsatz. Der Solver ermöglicht es, in einem simulierten evolutionsähnlichen Prozess Kombinationen (Individuen) aus zwei oder mehreren Eingangsparametern (Genomen) zu erzeugen, diese auf Grundlage von definierten Zielparametern (sog. Fitnessparametern) zu bewerten und daraufhin neue Eingangsparameterkombinationen zu finden, welche dem gewünschten Ziel-Fitnessparameter möglichst nahe kommen.

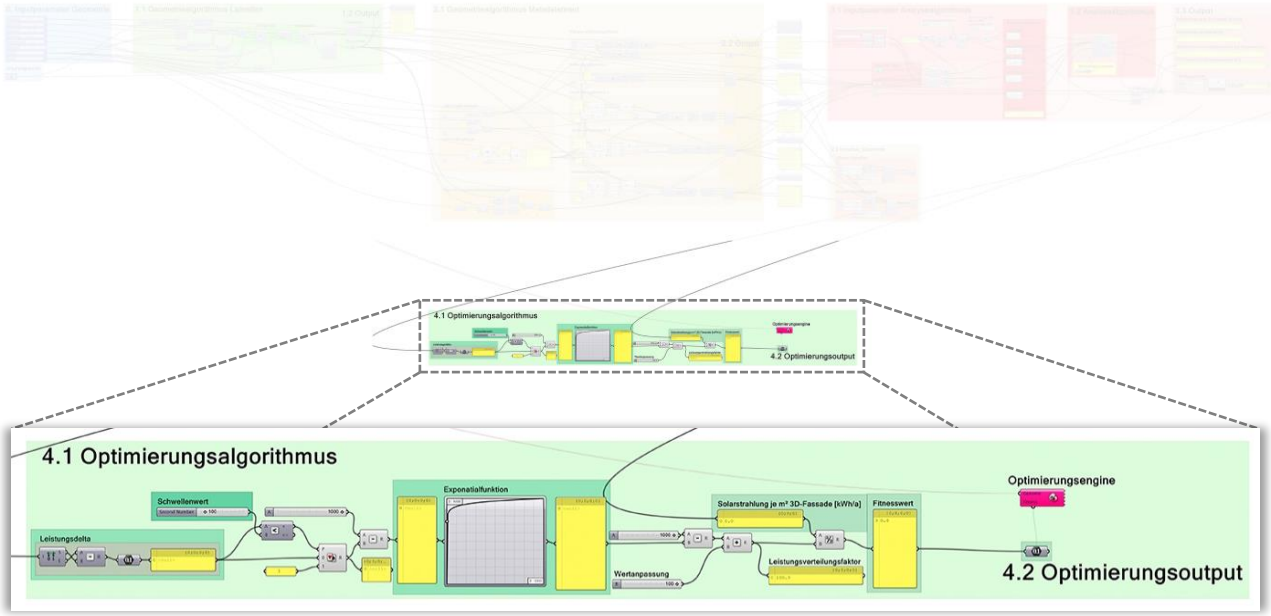


Abb. 43: Optimierungsalgorithmus

Gut erklären lässt sich der Algorithmus an folgendem Beispiel: Abb. 44 zeigt die sog. Fitnesslandschaft. Auf der X- und Y-Achse finden sich die beiden Eingangsparameter bzw. Genome „Rotations- und Kippwinkel“. Es kann auch mehr als zwei Eingangsparameter geben, jedoch lässt sich dies weniger gut räumlich veranschaulichen. Die dargestellte Fitness-Landschaft ist das Ergebnis einer evolutionären Simulation, wobei die Hochpunkte für Parameterkombinationen stehen, welche der Zielvorgabe möglichst nahe kommen. Wenn der Solver startet, ist die Fitness-Landschaft gleichmäßig und zufällig mit Individuen bevölkert (vgl. Abb. 45). Der entsprechende Fitnesswert (Z-Achse) wird errechnet und die Werte hierarchisch geordnet, wobei die schlechtesten ausgelöscht werden. In der nächsten Generation (vgl. Abb. 46) werden aus den besten Individuen der 0. Generation neue Individuen „gezüchtet“, welche ähnliche Genom-Kombinationen aufweisen. Abb. 47 zeigt die im gleichen Prozess erzeugte nächste Generation. Hier wird deutlich, dass sich die Population langsam um die Hochpunkte ansammelt und somit dem gewünschten Zielergebnis immer näher kommt.

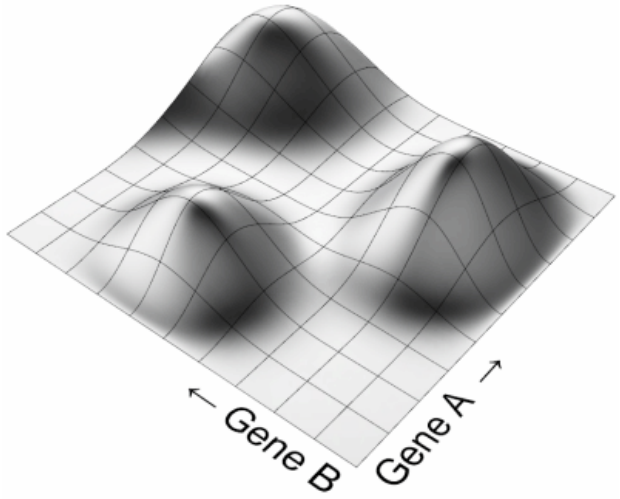


Abb. 44: FITNESSLANDSCHAFT

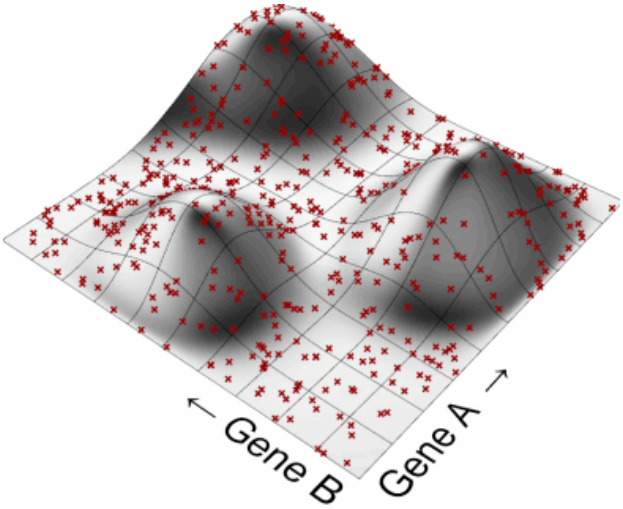


Abb. 45: Nullte Generation

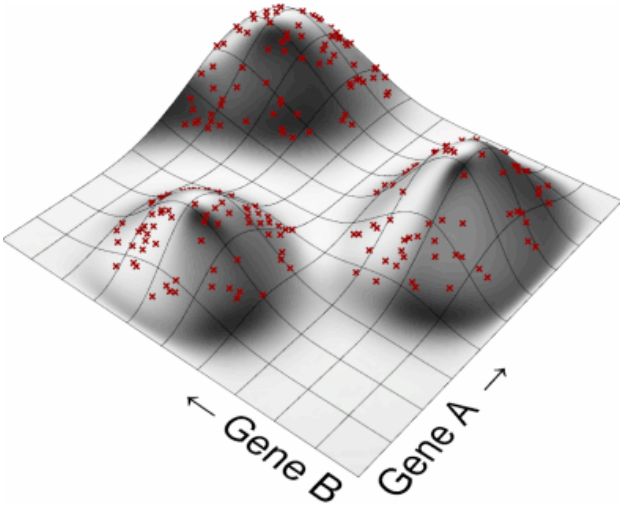


Abb. 46: Erste Generation

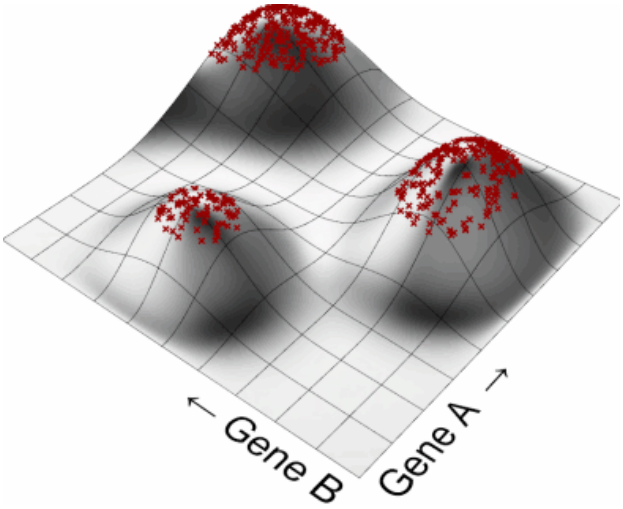


Abb. 47: Zweite Generation

Wichtig für das Erreichen der optimalen Ausrichtung der Lamellen - unter Berücksichtigung aller Einflussparameter - ist die genaue Definition des Fitnesswertes, also der Zahl, die es im Optimierungsprozess zu maximieren gilt. Die erstellte Fitnessfunktion beinhaltet zwei Kerngedanken: zum einen soll die berechnete Einstrahlung, welche vom Analyse-Algorithmus ausgegeben wird, auf der gesamten PV-aktiven Fläche möglichst groß sein, zum anderen muss das zuvor beschriebene Leistungsdelta über die einzelnen Berechnungssensoren möglichst gering sein, was gleichbedeutend mit einer geringen Eigenverschattung ist. Als Schwellenwert wurde ein Delta von 100 kWh/m^{2}a gesetzt. Eine integrierte Exponentialfunktion sorgt dafür, dass bei Überschreitung der Schwelle die Fitness exponentiell schlechter wird und somit trotz möglicherweise guter Gesamteinstrahlwerte auf der Lamelle kein hoher Fitnesswert erzielt werden kann. Zusätzlich zum Input des Fitnesswertes fließen die Genome „Rotations-„ (rw) und „Kippwinkel“ (kw) in den generativen Prozess ein. Der Solver hat dabei direkten Einfluss auf den „Number Slider“ und kann somit im iterativen Prozess die Winkel steuern. Ein Eingreifen des Solvers durch Änderung der Winkel löst sofort

eine Neuberechnung der Einstrahlwerte auf der Testlamelle aus. Das Ergebnis wird anschließend automatisch in den Solver zurückgespielt und nach dessen Fitness bewertet. Daraufhin wird ein neues Parameterpaar (Individuum) gebildet und an die „Number Slider" übertragen. Dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis die Fitnesswerte der besten 50 Individuen stagnieren oder es zu einem Abbruch durch den Benutzer kommt. Diejenige Kombination von Winkeln mit dem höchsten zugeordneten Fitnesswert ist somit als Optimum für das definierte Szenario zu bewerten.

4.2 Vergleich der optimiert ausgerichteten PV mit einer vertikal-planar ausgerichteten PV

Anschließend an die Optimierung der Lamellen-Ausrichtung wurde ein Vergleich zwischen der solar optimierten Fassade und einer nicht optimierten, planaren PV-Applikation angestellt, um die Ertragsunterschiede ermitteln zu können.

Transformation durch Veränderung der Ausrichtung

Um herauszufinden, wie sich eine Änderung der Gesamtfassaden-Ausrichtung auf die Ausrichtungsoptimierung der Lamelle auswirkt, wurde eine Simulationsreihe durchgeführt, bei der das voll parametrisierte Fassadenmodell in 10°-Schritten von einer Süd- in eine Westausrichtung transformiert und in jedem Schritt einem Optimierungsprozess unterzogen wird (vgl. Abb. 48).

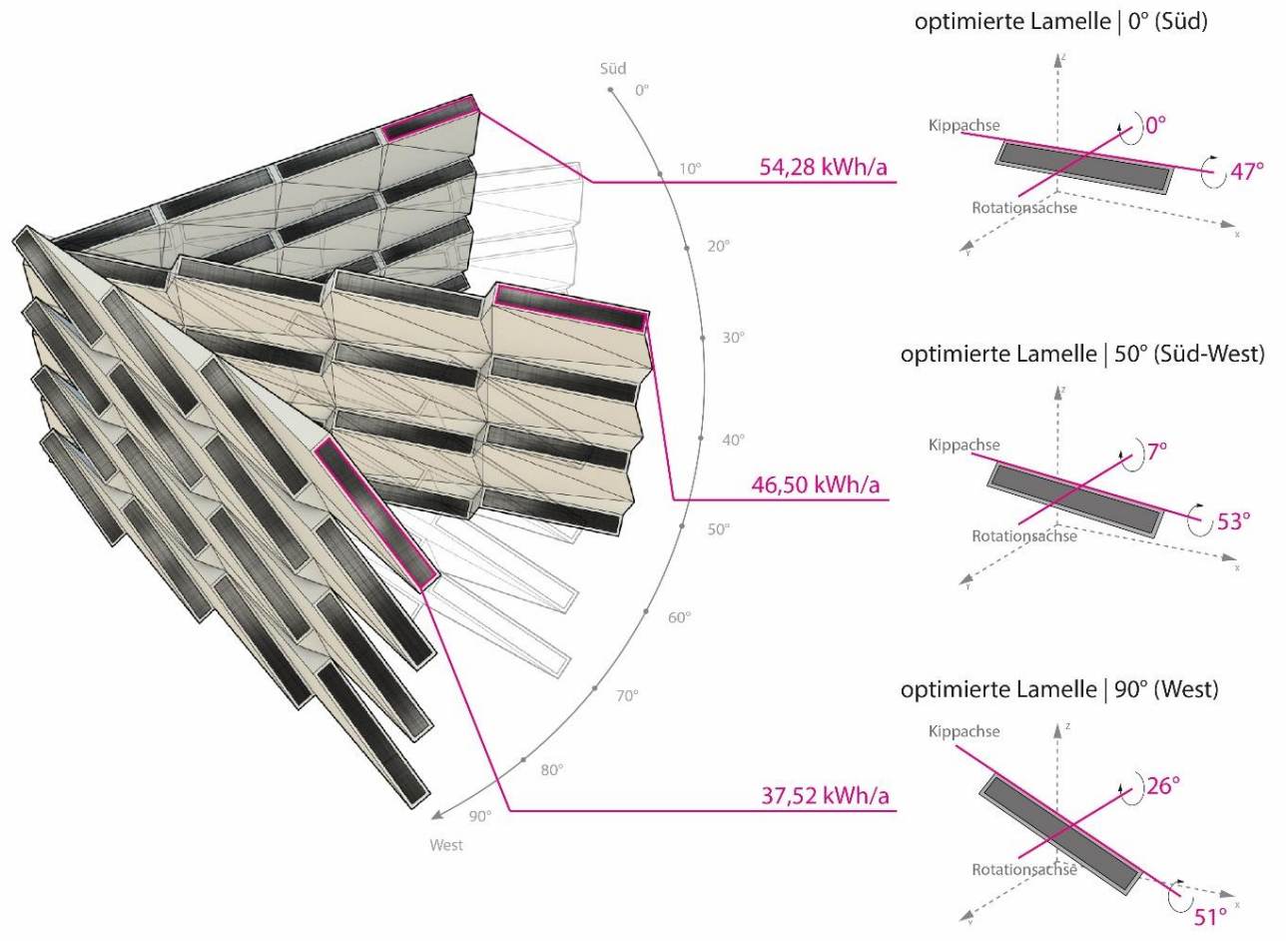


Abb. 48: Fassadentransformation von Süd- zur Westausrichtung

Zur Beschleunigung der aufwendigen Berechnungsreihe wurde zunächst auf eine Umgebungsbebauung verzichtet. Bei Betrachtung der nachfolgenden zweiten Simulationsreihe über die Gebäudehöhe (vgl. Tab. 11) ließ sich jedoch vermuten, dass die Einbeziehung der Umgebungsbebauung noch deutlicher die Vorteilhaftigkeit der optimierten Lamelle herausstellen würde.
Parallel dazu wurde eine zweite Simulationsreihe mit einer zur Fassade planaren (unoptimierten) Lamelle gleicher Größe durchgeführt (vgl. Tab. 12). Der Vergleich der Energieeinträge aus beiden Simulationsreihen zeigt, dass durch die Optimierung eine bis zu 40-prozentige Steigerung der Energieeinträge pro m² erreicht werden kann (vgl. Abb. 49, Seite 63). Die eingesetzte PV-aktive Fläche kann somit deutlich effektiver betrieben werden. Zudem wird deutlich, dass eine optimiert ausgerichtete Lamelle mit 39,69 kWh/a Ertrag in einer Gesamtfassadenausrichtung von 80° (West) leistungsfähiger als eine planare Lamelle mit direkter Südausrichtung (39,13 kWh/a) ist.

Tab. 11: Simulationsergebnisse optimierte Lamelle

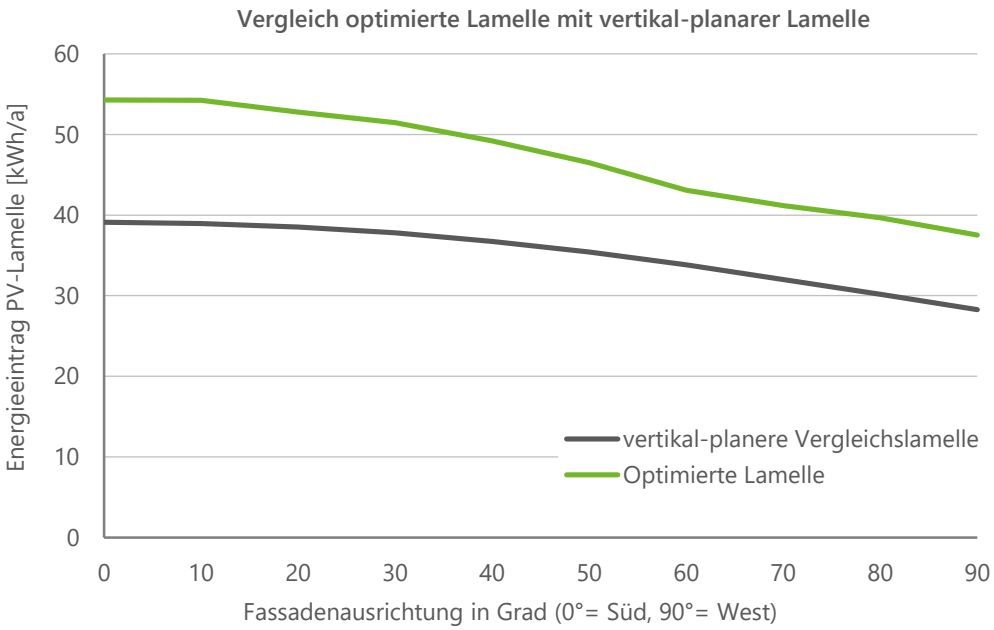
OPTIMIERTE LAMELLE											
Fassaden-orientierung [°]		Rotations-winkel [°]	Kipp-winkel [°]	Größe Ge-samtmodul* [m²]	Größe PV-Fläche [m²]	Energieeintrag PV-Fläche [kWh/a]	Energieeintrag je m² PV-Fläche [kWh/m²$_{pv}$*a]	Energieeintrag je m² 3D-Fassade [kWh/m²$_{fas}$*a]	Leistungs-delta [kWh/a]	Fitness	Bem.
Süd	0	0	-47	0,271	0,050	54,28	1095,46	200,34	37	2,003	H1**
	10	1	-44	0,271	0,050	54,26	1095,07	200,27	31,9	2,002	
	20	2	-48	0,271	0,050	52,78	1065,15	194,81	28,7	1,947	
	30	2	-44	0,271	0,050	51,46	1038,45	189,93	38,3	1,899	
	40	5	-49	0,271	0,050	49,19	992,70	181,55	41,3	1,815	
	50	7	-53	0,271	0,050	46,50	938,43	171,63	65,6	1,716	
	60	15	-54	0,271	0,050	43,09	869,67	159,04	117,7	1,511	H2***
	70	19	-54	0,271	0,050	41,18	831,00	151,99	73,1	1,519	
	80	25	-50	0,271	0,050	39,69	801,06	146,49	53,7	1,464	
West	90	26	-51	0,271	0,050	37,52	757,11	138,48	58,6	1,384	

Radianceparameter: -ab 7 –ad 4096 –ar 512 –as 1024 –aa 0,1 –lw 0,001 | Berechnungsgrid: 10 mm
** planar auf Fassadenfläche projiziert*
*** Hüllflächenalgorithmus 1*
**** Hüllflächenalgorithmus 2*

Tab. 12: Simulationsergebnisse vertikal-planare Vergleichslamelle

PLANARE VERGLEICHSLAMELLE											
Fassaden-orientierung [°]		Rotations-winkel [°]	Kipp-winkel [°]	Größe Ge-samtmodul* [m²]	Größe PV-Fläche [m²]	Energieeintrag PV-Fläche [kWh/a]	Energieeintrag je m² PV-Fläche [kWh/m²$_{pv}$*a]	Energieeintrag je m² 3D-Fassade [kWh/m²$_{fas}$*a]	Leistungs-delta [kWh/a]	Fitness	Bem.
Süd	0	0	-90	0,27	0,05	39,13	789,61	144,42	7,3	1,444	
	10	0	-90	0,27	0,05	38,95	785,98	143,76	6,7	1,437	
	20	0	-90	0,27	0,05	38,53	777,66	142,21	7,5	1,422	
	30	0	-90	0,27	0,05	37,79	762,68	139,48	5,5	1,394	
	40	0	-90	0,27	0,05	36,72	740,94	135,53	5,5	1,355	
	50	0	-90	0,27	0,05	35,42	714,90	130,73	6,4	1,307	
	60	0	-90	0,27	0,05	33,84	682,89	124,90	6,2	1,248	
	70	0	-90	0,27	0,05	32,00	645,71	118,11	4,1	1,181	
	80	0	-90	0,27	0,05	30,19	609,35	111,43	5,4	1,114	
West	90	0	-90	0,27	0,05	28,26	570,28	104,30	3,2	1,043	

Radianceparameter: -ab 7 –ad 4096 –ar 512 –as 1024 –aa 0,1 –lw 0,001 | Berechnungsgrid: 10 mm
** planar auf Fassadenfläche projiziert*



Fassaden-orientierung [°]		Eintrags-steigerung [%]
Süd	0	+39
	10	+39
	20	+37
	30	+36
	40	+34
	50	+31
	60	+27
	70	+29
	80	+31
West	90	+33

Abb. 49: Vergleich optimierte Lamelle mit vertikal-planarer Lamelle entsprechend der Fassadenorientierung

<u>Transformation über die Gebäudehöhe</u>

Um festzustellen, wie der Optimierungs-Algorithmus auf eine gegenüberliegende Bebauung reagiert, wurde eine weitere Simulationsreihe für eine innerstädtische Westfassade berechnet. Die Optimierung der Testlamelle wurde dabei in sechs unterschiedlichen Höhen jeweils kurz über der Oberkante der Geschossdecke ausgeführt (vgl. Abb. 50 & Tab. 13).

Wie schon in der Untersuchung mit unterschiedlichen Gesamtfassaden-Ausrichtungen (Süd & West) wurde zusätzlich eine zweite Simulationsreihe mit einer planaren Vergleichslamelle bei gleichbleibenden Randparametern durchgeführt (vgl. Tab. 14).

Vergleicht man die beiden Simulationsreihen (vgl. Abb. 51) miteinander, so zeigt sich, dass in diesem für die solare Stromgewinnung anspruchsvolleren Szenario ein großes Potential in der Optimierung liegt: Es ergibt sich eine bis zu 55-prozentige Steigerung der Energieeinträge in den stärker durch Umgebungsverschattung belasteten Gebäudebereichen.

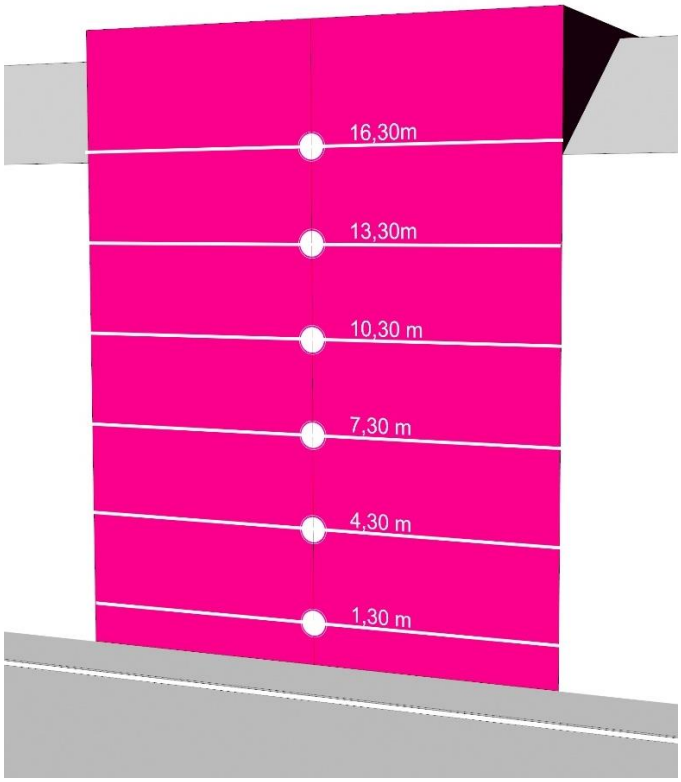


Abb. 50: Höhenpositionen der simulierten Lamellen

Tab. 13: Simulationsergebnisse der optimierten Lamelle

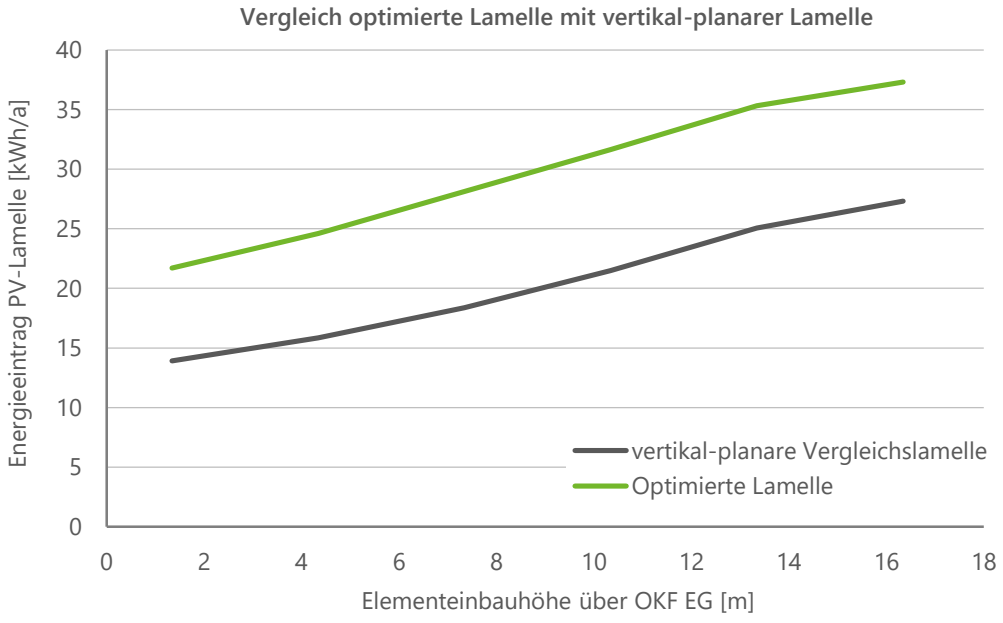
OPTIMIERTE LAMELLE										
Geschoss	Elementhöhe ü. OKF EG [m]	Rotations-winkel [°]	Kipp-winkel [°]	Größe Ge-samtmodul* [m²]	Größe PV-Fläche [m²]	Energieeintrag PV-Fläche [kWh/a]	Energieeintrag je m² PV-Fläche [kWh/m²$_{pv}$*a]	Energieeintrag je m² 3D-Fassade [kWh/m²$_{fas}$*a]	Leistungs-delta [kWh/a]	Fitness
5.OG	16,34	27	-39	0,27	0,05	37,33	789,61	137,78	86,4	1,377
4.OG	13,34	27	-37	0,27	0,05	35,34	785,98	130,44	80,0	1,304
3.OG	10,34	26	-43	0,27	0,05	31,66	777,66	116,85	79,4	1,168
2.OG	7,34	27	-36	0,27	0,05	28,13	762,68	103,82	82,3	1,038
1.OG	4,34	27	-35	0,27	0,05	24,61	740,94	90,83	83,5	0,908
EG	1,34	28	-34	0,27	0,05	21,70	714,90	80,09	82,7	0,801

Radianceparameter: -ab 7 –ad 4096 –ar 512 –as 1024 –aa 0,1 –lw 0,001 | Berechnungsgrid: 10 mm
** planar auf Fassadenfläche projiziert*

Tab. 14: Simulationsergebnisse der planaren Vergleichslamelle

PLANARE VERGLEICHSLAMELLE										
Geschoss	Elementhöhe ü. OKF EG [m]	Rotations-winkel [°]	Kipp-winkel [°]	Größe Ge-samtmodul* [m²]	Größe PV-Fläche [m²]	Energieeintrag PV-Fläche [kWh/a]	Energieeintrag je m² PV-Fläche [kWh/m²$_{pv}$*a]	Energieeintrag je m² 3D-Fassade [kWh/m²$_{fas}$*a]	Leistungs-delta [kWh/a]	Fitness
5.OG	16,34	0	-90	0,27	0,05	27,33	551,51	100,87	1,2	1,008
4.OG	13,34	0	-90	0,27	0,05	25,07	505,89	92,53	2,0	0,925
3.OG	10,34	0	-90	0,27	0,05	21,48	433,55	79,28	1,5	0,792
2.OG	7,34	0	-90	0,27	0,05	18,38	370,83	67,84	1,8	0,678
1.OG	4,34	0	-90	0,27	0,05	15,86	320,09	58,54	1,6	0,584
EG	1,34	0	-90	0,27	0,05	13,92	280,94	51,38	2,2	0,514

Radianceparameter: -ab 7 –ad 4096 –ar 512 –as 1024 –aa 0,1 –lw 0,001 | Berechnungsgrid: 10 mm
** planar auf Fassadenfläche projiziert*



Element-höhe ü. OKF EG [m]	Eintrags-steigerung [%]
16,34	+37
13,34	+41
10,34	+47
7,34	+53
4,34	+55
1,34	+56

Abb. 51: Vergleich: optimierte & vertikal-planare Lamelle entsprechend der Elementeinbauhöhe

4.3 Architektonische Entwurfsvarianten

Aus den Voruntersuchungen wurden drei mögliche Lösungsvarianten extrahiert und weiterentwickelt:
- A | Gefaltete Fassade mit integrierter Photovoltaik
- B | Mauerwerksfassade mit steinintegrierter Photovoltaik
- C | Kiemenstruktur-Fassade mit auflaminierter Photovoltaik

4.3.1 Variante A | Gefaltete Fassade mit integrierter Photovoltaik

Die Variante einer gefalteten Fassade mit integrierten PV-Lamellen (vgl. Abb. 52), wie sie unter 4.1 systematisch beschrieben wurde, bietet aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit ein potentiell breites Einsatzfeld.

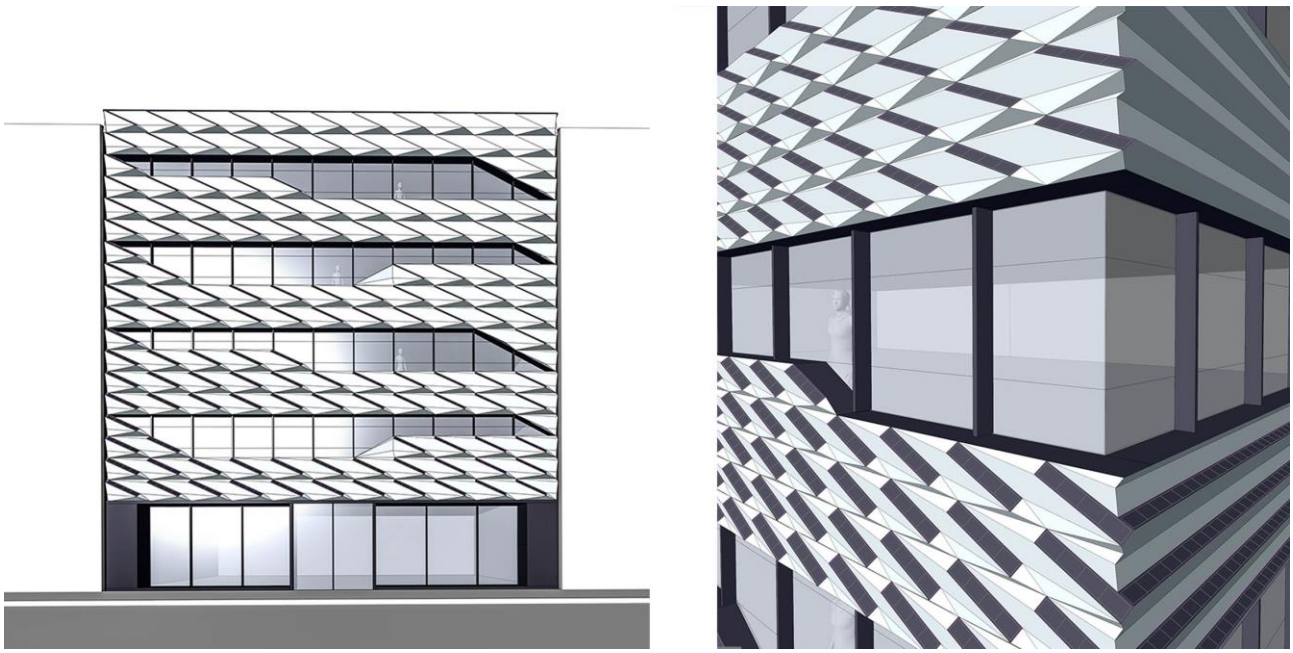


Abb. 52: Gefaltete Metallfassade, Ansicht & Eckdetail | CGI: A. Heller, ai:L

Geometrisches Prinzip

Geometrisch betrachtet setzt sich die Fassade aus gefalteten kassettenartigen Modulen zusammen. Wie in Abb. 53 dargestellt, besteht ein Modul aus zwei Flächentypen: einer in der solaren Ausrichtung optimierten Lamelle (A) und Verbindungsflächen (B). Innerhalb des digitalen Optimierungsprozesses sind die Lamellen durch die Rotation in zwei Achsen beweglich. Für ein konkretes Einsatzszenario wird im digitalen Prozess eine solar optimierte fixe Ausrichtung bestimmt. Flächentyp B ist die Verbindungsfläche von Lamelle zu Lamelle unter Berücksichtigung einer möglichst geringen Eigenverschattung. So entsteht ein aus Aluminiumverbundplatten gefaltetes Basismodul, welches zusammen mit jeweils einer PV-Lamelle das Fassadenelement bildet. Es kann z. B. in vorgehängte hinterlüftete Fassade eingebracht werden.

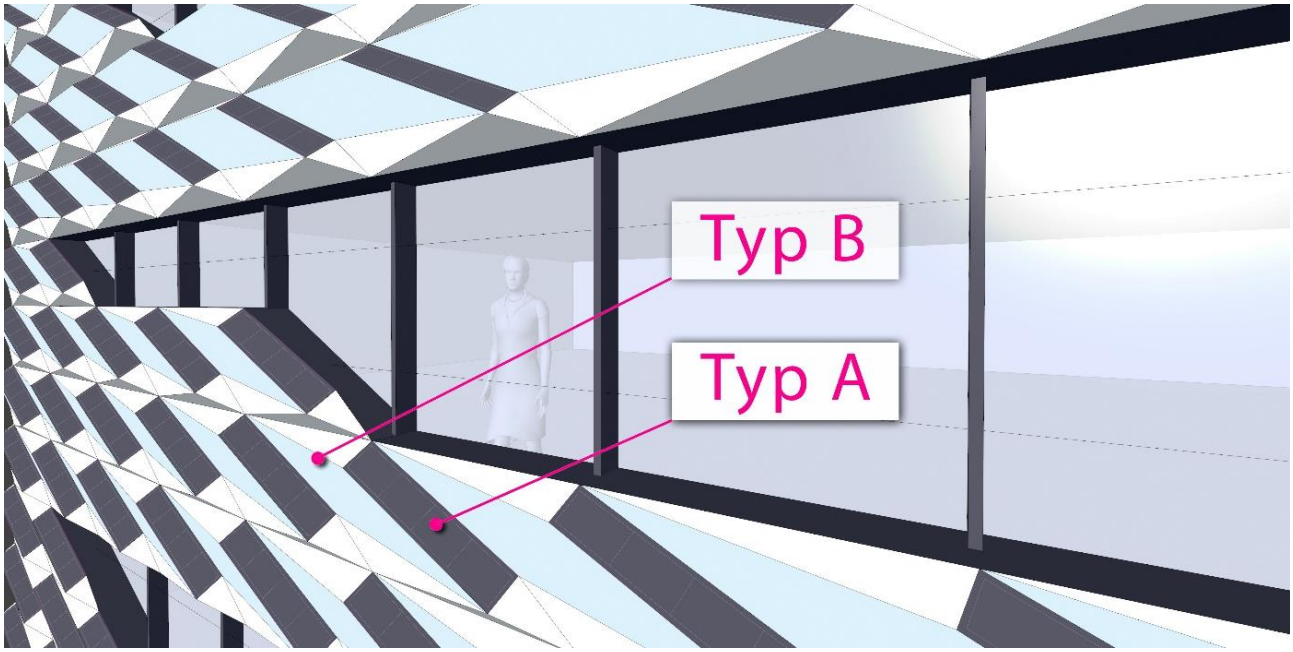


Abb. 53: Close-Up der gefalteten Fassade | CGI: A. Heller, ai:L

Fassadengliederung

Das Fassadenraster ergibt sich aus der Elementgröße, welche wiederum abhängig von der eingesetzten PV-Lamelle ist. Ein Elementraster von 1,50 m x 0,75 m hat sich dabei als vorteilhaft herausgestellt. Es gewährleistet ein optimales Verhältnis von PV-Fläche zu Hüllfläche und ermöglicht mit einer Höhe von 0,75 m einen nutzungsneutralen Einsatz. So kann bspw. ein 3 m hohes Geschoss mit vier Fassadenbändern realisiert werden. Die durchlaufende Horizontale ermöglicht eine Ausbildung von Brüstungs- und Deckenbändern. In der Vertikalen löst sich die Modulhaftigkeit der Elemente durch diagonale Überschiebungen auf. Der Sockelbereich eines Gebäudes kann aufgrund der dortigen geringen Effizienz PV-aktiver Flächen als eigenständiger Fassadenteil gestaltet werden.

Eckausbildung

Betrachtet man das erarbeitete Beispiel einer Eckausbildung der gefalteten Fassade zeigt sich, dass ein sauberer Übergang zwischen den für eine Westausrichtung optimierten Elementen (diagonale PV-Lamellen) und den für eine Südausrichtung optimierten (horizontale PV-Lamellen) im modularen System umsetzbar ist.

Öffnungen

Öffnungen (Fenster, Türen) können innerhalb des Elementrasters mit angepasster Laibung oder über Modulpassstücke bzw. Halbelemente ins Fassadenraster eingebracht werden. Um den Einsatz von Passstücken möglichst gering zu halten, bietet sich der Einsatz von Fensterbändern an.

Photovoltaik-Technologie

Um die Vorteile der optimiert ausgerichteten PV-Flächen möglichst effektiv auszunutzen, wurde für die PV-Lamellen der Einsatz monokristalliner Hochleistungszellen vorgesehen. Diese bieten auch bzw. gerade in einer nicht flächendeckenden Anwendung einen sinnvollen Energie-Output.

Solare Potentiale

Die Falschfarbendarstellung in Abb. 54 zeigt, dass, über den Jahresverlauf gerechnet, sehr ausgeglichene Einstrahlergebnisse erzielt werden können. Die optimiert ausgerichtete PV-Lamelle ist somit in der Lage, konstant hohe Erträge im entsprechenden Einsatzszenario zu erzielen.

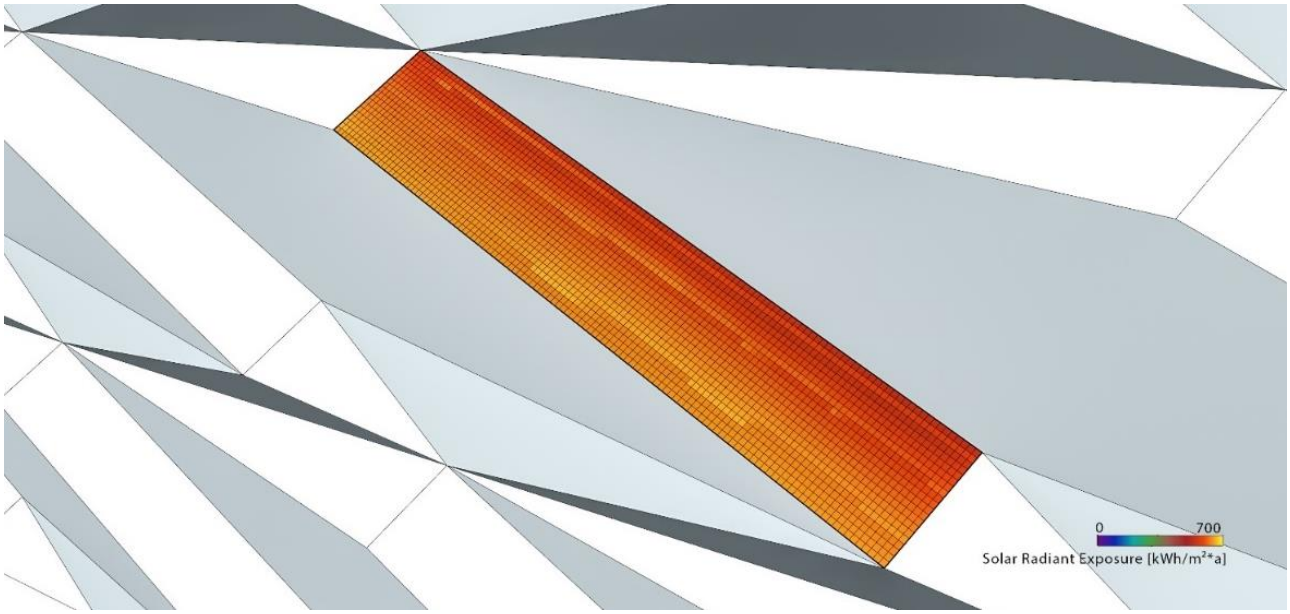


Abb. 54: Falschfarbendarstellung der solaren Einstrahlung über den Jahresverlauf | CGI: A. Heller, ai:L

Umsetzungsmöglichkeiten

Die einzelnen Fassadenelemente lassen sich im Werk automatisiert vorfertigen. Hierfür wird zunächst aus dem digitalen 3D-Modell eine Abwicklung erzeugt und in Fräsdaten umgewandelt, die von einer Fräsmaschine auf die Metallverbundplatte übertragen werden. Anschließend kann der Faltbogen ähnlich einer Metallkassette durch Faltung in seine endgültige Form gebracht und durch Vernieten der Ecken fixiert werden. Im nächsten Schritt könnte die vorgefertigte PV-Lamelle über ein Rahmensystem in das Metallfaltelement eingebracht und das gefügte Element auf der Baustelle schließlich an eine entsprechende Unterkonstruktion angebracht und verschaltet werden. Optional können mehrerer Elemente auf einer Unterkonstruktion im Werk vormontiert und vorverschaltet werden, um den Arbeitsaufwand auf der Baustelle zu verringern.

4.3.2 Variante B | Mauerwerksfassade mit steinintegrierter Photovoltaik

Die Variante eines „Solarziegels“ (siehe Abb. 55) bietet aufgrund der Kleinteiligkeit der Komponenten ein sehr großes Optimierungspotential für die solaren Erträge. Ähnlich der expressionistischen Architektur der 20er Jahre eröffnet die Kombination von Mauerwerk und PV-Technologie eine neue Ebene der Sinnhaftigkeit von Fassadengestaltungen.

Abb. 55: Ziegelfassade mit integrierten PV-Zellen, Ansicht & Close-Up | CGI: A. Heller, ai:L

Geometrisches Prinzip

Die zweigeteilte Fassade des Entwurfes (vgl. Abb. 55) wird durch eine durchlaufende vertikale Kante definiert, die aus der Fassadenebene herausgezogen ist und der Fassade eine Dreidimensionalität verleiht. Rechts der Kante entsteht die Möglichkeit, durch schuppenartiges Herausschieben der Mauersteine Flächen zu generieren, welche mit PV-Elementen belegt und so aktiviert werden können. Je nachdem, wie die Fassade ausgerichtet ist (West, Südwest, etc.), drehen sich die Solarziegel mehr oder weniger weit heraus, um optimale Einstrahlungswerte zu erhalten. In der Beispielvariante wurde den Solarziegeln zur Optimierung ihrer Ausrichtung zunächst nur eine Bewegungsachse zugewiesen (Z-Achse). Es wäre jedoch in Anbetracht der Möglichkeit, individuell geformte Steine einzusetzen auch denkbar, die Optimierung auf weitere Freiheitsgrade zu erweitern.

Fassadengliederung

Das Fassadenraster unterliegt in der Horizontalen und Vertikalen dem entsprechend gewählten Steinmaß. Im Beispiel wurde ein Ziegelformat von 12 DF (24 cm x 36,5 cm x 23,8 cm) gewählt, um eine kristalline Standard-Silizium-PV-Zelle mit den nötigen Randabständen integrieren zu können. Die Steine sind in einem Läuferverband gefügt, sodass die Fassade eine Horizontalität erhält. Die durchlaufenden vertikalen Mauerwerkselemente lassen die Fassade optisch auf dem Boden ankommen. Eine stark aufgelöste und durch massive Säulen gegliederte Sockelzone hebt die Fassade ab und betont ihre Expressivität.

Eckausbildung

Durch das große Individualisierungspotential der Fassade ist eine Eckausbildung ohne Einschränkungen der Erträge den Anforderungen entsprechend umsetzbar.

Öffnungen

Öffnungen können im Falle der Fügung der Solarziegel in Halbfertigteilen relativ frei gesetzt werden. Somit kann von Loch- bis Bandfassaden eine hohe gestalterische Vielfalt erreicht werden.

Photovoltaik-Technologie

Für eine Integration in Ziegel wären sowohl kristalline als auch organische Zelltypen denkbar. Der Vorteil von organischer PV ist die höhere Effizienz bei diffuser Strahlung (z. B. bei bewölktem Himmel) sowie bei Teilverschattungen (z. B. durch Gebäudeteile). Silizium-PV mit einem Glas-Frontsheet eignet sich jedoch aus Gründen der PV-Modul-Sicherheit sowie aus haptischen Gründen für eine Kombination mit Klinkern besser als organische Zelltypen. Die im Beispiel eingesetzten PV-Elemente wurden in den Dimensionen 20 cm x 20 cm (Sichtfläche) angenommen, was wiederum den Einsatz von Standard-Silizium-Zellen aus dem preisgünstigen Massenmarkt möglich macht.

Solare Potentiale

Die Falschfarbendarstellung in Abb. 56 zeigt, dass, trotz der nur einachsigen Optimierung über einen Jahresverlauf gerechnet bereits hohe Erträge erreicht werden können.

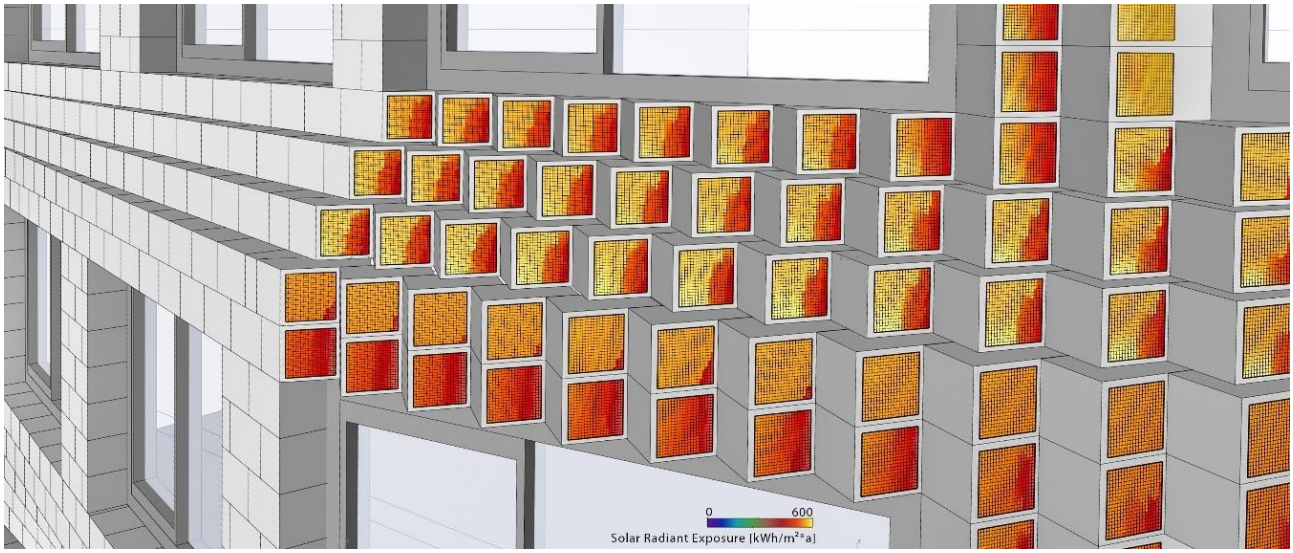


Abb. 56: Falschfarbendarstellung der solaren Einstrahlung über einen Jahresverlauf | CGI: A. Heller, ai:L

Umsetzungsmöglichkeiten

Die Solarziegel-Fassade könnte in Form von Halbfertigteilen komplett im Werk vorgefertigt werden. Die einheitliche Steingröße (12 DF) ermöglicht trotz vorzusehender Aussparungen für die PV-Elemente eine Fertigung im industriellen Maßstab. Nachdem das Solarmodul in den Stein eingesetzt wurde, übernimmt ein Mauerroboter mithilfe der Maschinendaten, welche aus dem 3D-Fassadenmodell generiert werden, die Fügung der Solarziegel (siehe Abb. 57). Anschließend können die entstandenen Halbfertigteile zu einem Modul verschaltet und auf die Baustelle geliefert werden. Dort werden sie mit anderen Halbfertigteilen zur Gebäudehülle komplettiert.

Abb. 57: Mauerroboter der Firma Fastbrick Robotics Ltd. | Quelle: http://www.infrastructure-intelligence.com/article/nov-2014/new-robots-will-revolutionise-built-environment

4.3.3 Variante C | Kiemenstruktur-Fassade mit auflaminierter Photovoltaik

Die Kiemenstruktur-Fassade (siehe Abb. 58) beschreibt eine spezielle Variante, welche im Gegensatz zu den vorhergehenden Varianten auf einen großflächigen Einsatz von PV setzt.

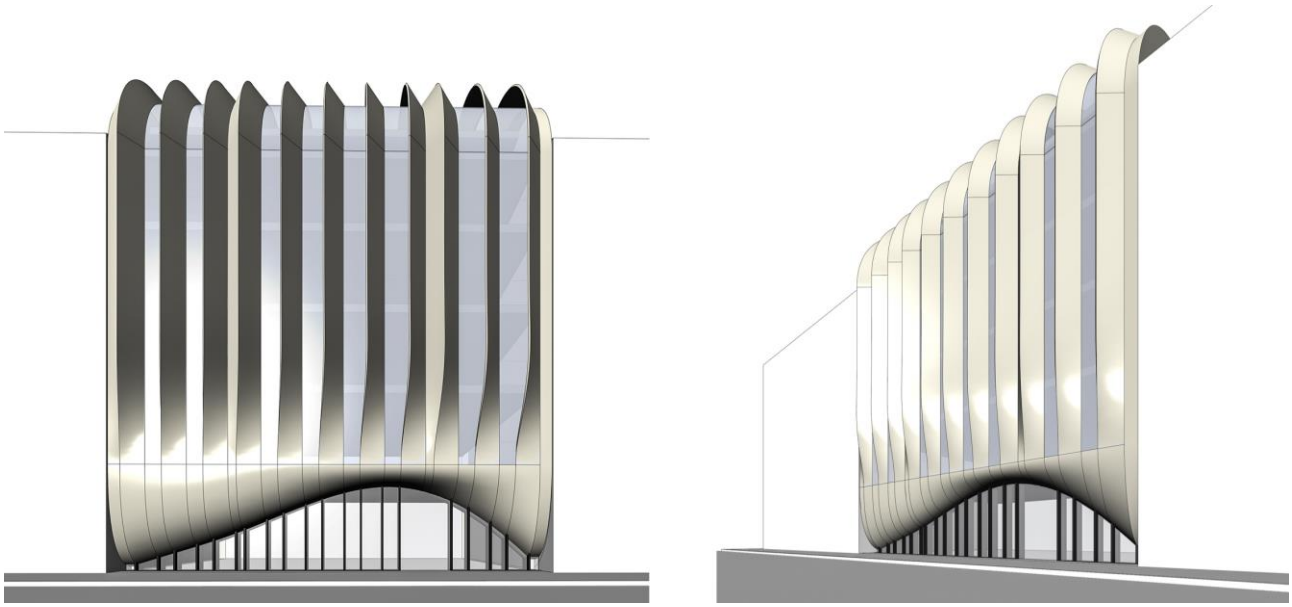


Abb. 58: Perspektivische Darstellung der Kiemenvariante | CGI: A. Heller, ai:L

Geometrisches Prinzip

Kiemenartig aufgefächerte Flächen bieten die Möglichkeit einer PV-Zellen-Integration. Die für einen Gebäudestandort optimierte solare Ausrichtung der Flächen kann über die Rotation in vertikaler Achse erreicht werden. Alle PV-aktiven Flächen wurden geometrisch als Regelflächen definiert.

Fassadengliederung

Das geometrische Grundprinzip der Kiemen erzeugt eine starke vertikale Gliederung der Fassade. Diese bestimmen, abhängig vom jeweiligen Ausstellwinkel und dem zur Belichtung und Belüftung notwendigen Glasflächenanteil, das Fassadenbild. Die Sockelzone bildet einen skulpturalen Auftakt und löst sich mit ansteigender Gebäudehöhe in Kiemenelemente auf.

Eckausbildung

Eine Eckausbildung wurde für diese Fassadenvariante nicht untersucht, da das Prinzip nur bei einseitig westlich oder östlich orientierten Fassaden sinnvoll einzusetzen ist (Eindrehung +/- 20°).

Öffnungen

Systembedingt sind Öffnungen in vertikaler Anordnung möglich. Um ein bestmögliches Verhältnis aus verglasten Flächen und PV-aktiven Flächen zu erhalten, sind bodentiefe Verglasungen sinnvoll.

Photovoltaik-Technologie

Aufgrund der am oberen und unteren Fassadenrand gebogen auslaufenden Kiemen ist der Einsatz geometrisch flexibler organischer PV sinnvoll.

Solare Potentiale

Die Falschfarbendarstellung in Abb. 59 zeigt, dass trotz der nur einachsigen Optimierung hohe Erträge über einen Jahresverlauf gerechnet erzielt werden können. Die im Gegensatz zu den vorangegangenen Varianten zusätzliche Nutzung der Dachfläche als integralen Bestandteil der Gebäudehüllfläche steigert das Potential der Kiemenvariante noch einmal.

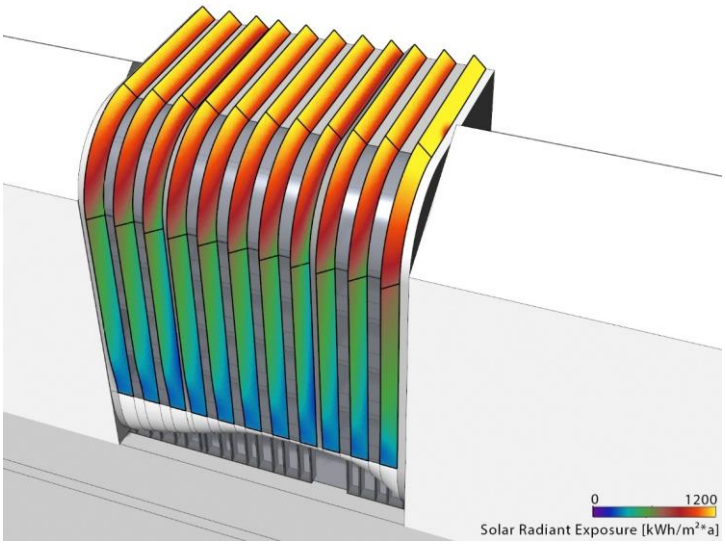


Abb. 59 (links): Falschfarbendarstellung der solaren Einstrahlung über den Jahresverlauf | CGI: A. Heller, ai:L

Umsetzungsmöglichkeiten

Die von der Fassade bis auf das Dach laufenden PV-Kiemen könnten segmentiert im Werk vorgefertigt werden. Als Trägermaterial für die auflaminierte organische PV könnte z. B. Textilbeton zum Einsatz kommen, der aufgrund seiner textilen Bewehrung schlank umsetzbar ist, aber auch ein leichtes, ebenfalls frei formbares Hochdrucklaminat oder Kunststoffe. Auf der Baustelle können die fertigen Elemente an vorgesehenen Haltekonsolen vor einer Glasfassade angebracht und verschaltet werden.

4.3.4 Zusammenfassung: Vergleich der Varianten

Vergleicht man alle drei Lösungsvarianten miteinander, zeigt sich eine aufgrund der systemischen Unterschiedlichkeit große entwurfliche Bandbreite. Jede der vorgestellten Varianten besitzt andere Vorteile, die

sie in verschiedenen Einsatzszenarien ausspielen kann. Nachfolgend sind noch einmal die Potentiale vergleichend zusammengefasst:

Variante A | Gefaltete Fassade mit integrierter Photovoltaik
- nutzt die eingesetzten monokristallinen Hochleistungs-PV-Zellen (ca. 20 % Wirkungsgrad) mit einem Eintrag von 637 kWh/(m^2_{pv}*a) am effizientesten aus (vgl. Tab. 15)
- geringste Gesamt PV-Fläche im Vergleich
- Minimalste Eigenverschattung durch optimierte Geometrie
- Maximale Anpassungsfähigkeit an verschiedene Fassadenausrichtungen durch 2 Freiheitsgrade
- Breites Einsatzfeld in allen vorgehängten hinterlüfteten Fassaden-Systemen
- Verschaltungsaufwand durch Modularität überschaubar
- bietet mit vielfältigen Metallverbundplatten gestalterisch viel Potential (Farbe, Textur, Glanz etc.)
- durch digitale Fertigungskette industriell herstellbar

Variante B | Mauerwerksfassade mit steinintegrierter Photovoltaik
- nutzt die eingesetzten PV-Zellen mit einem Eintrag von 349 kWh/(m^2_{pv}*a) im Vergleich weniger gut aus, und weist mit 82 m^2 eine doppelt so hohe PV-Fläche wie Variante A auf (vgl. Tab. 15)
- große Freiheit der optimierten Positionierung von Solarziegeln durch modulares Verbundsystem
- Einsatz unterschiedlicher Solarzellen denkbar (kristallin, organisch etc.)
- höherer Verschaltungsaufwand, da nur eine PV-Zelle je Steinmodul
- im Vergleich beste architektonische Integrationsfähigkeit in Bestandsbebauungen
- durch Vorfertigung zu Halbfertigteilen mit Mauerrobotern effizient herstellbar

Variante C | Kiemenstruktur-Fassade mit auflaminierter Photovoltaik
- mit 550 kWh/m^2pv*a gute solare Einträge möglich (vgl. Tab. 15)
- aufgrund der großen nutzbaren Fläche von 180 m^2 maximale Gesamterträge im Vergleich möglich
- weitere Steigerung der Gesamterträge durch Einbeziehen der Dachflächen möglich (vgl. Tab. 15))
- geringeres Optimierungspotential (1 Freiheitsgrad)
- durch Einsatz von flexibler organischer PV hohes Potential im diffusen Bereich, jedoch kleinerer Wirkungsgrad (ca. 9 %) im Vergleich zu Hochleistungszellen (ca. 20 %)
- relativ geringer Verschaltungsaufwand, da größere Module umsetzbar
- Erscheinung wird durch den flächigen Einsatz stark von PV-Materialität geprägt
- hohes Vorfertigungspotential

Tab. 15: Simulationsergebnisse der drei Lösungsvarianten | Quelle: A. Heller, ai:L

Variante	PV-Modulgröße [m^2]	Anzahl PV-Module	Größe PV-Fläche [m^2]	Gesamtenergieeintrag aller PV-Flächen [kWh/a]	Gesamtenergieeintrag je m^2 PV-Fläche [kWh/(m^2_{PV}*a]
A | Faltung	0,24	166	40	25.372	637
B | Stein	0,08	1.009	82	28.448	349
C.1 | Kiemen	16,37	11	180	99.041	550
C.2 | Kiemen*	23,75	11	261	180.517	691

** Variante inkl. Dachfläche*
Radianceparameter: -ab 7 –ad4096 – ar 512 –as 1024 –aa 0,1 –lw 0,001

5 Ausarbeitung der Entwurfsvariante „Gefaltete Metallfassade mit integrierter Photovoltaik“

Ausgehend von den architektonischen Rahmenvorgaben wurde die ausgewählte Entwurfsvariante baukonstruktiv soweit ausgearbeitet, dass sie als finaler Demonstrator umgesetzt werden konnte. Bei der Entwicklung der PV-integrierten Fassadenelemente aus Metall wurden Standard-Fassadensysteme an die neuen Anforderungen einer dreidimensionalen Faltung angepasst und mit innovativen PV-Komponenten kombiniert. Die folgende Abb. 60 zeigt den Entwurf für eine vorgehängte, hinterlüftete Metallfassade vor einer Unterkonstruktion aus Horizontal- und Vertikallattung. Die vertikalen T-Profile sind durch eine Wandhalterung an der Außenwand befestigt. Das Fassadenelement selbst besteht aus gefalteten Aluminium-Verbundplatten mit einer Höhe von jeweils 75 cm, einer Breite von 289 cm und eine Tiefe von max. 17 cm. Darin eingesetzt ist ein Glas-Folie-PV-Modul, das vom Partner Fraunhofer CSP speziell angefertigt wurde.

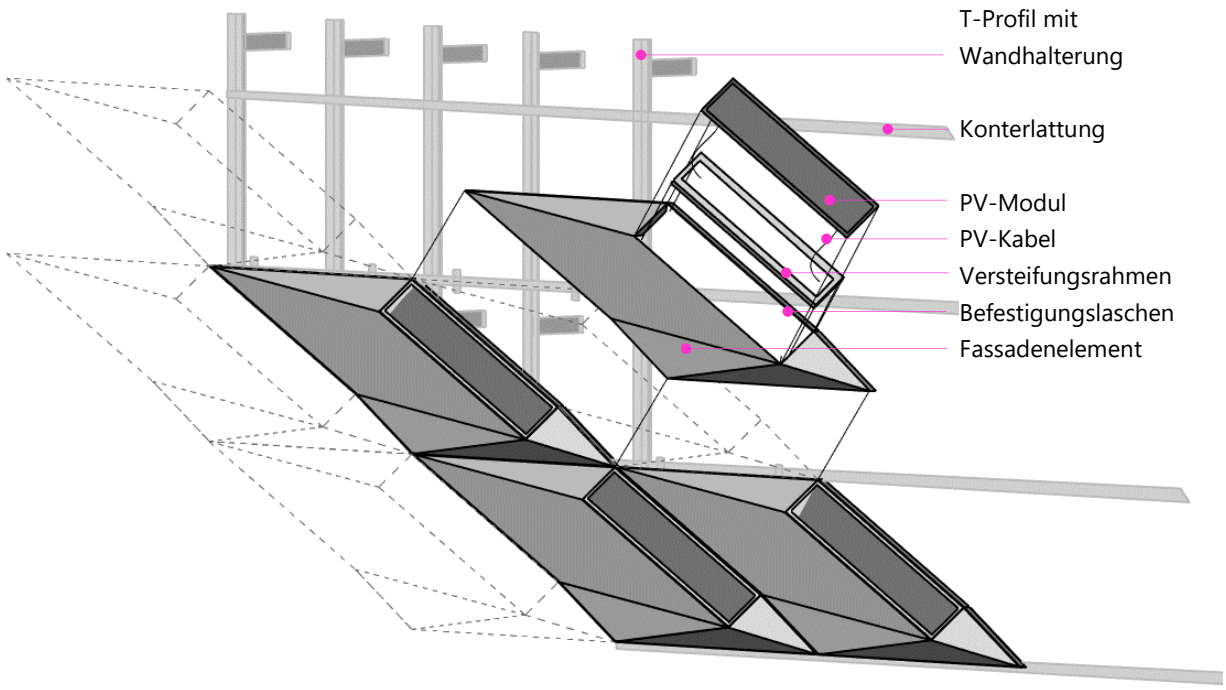


Abb. 60: Schematische Darstellung des Metall-PV-Fassadenelementes an der Fassade, | Grafik: A. Heller, ai:L

5.1 Konstruktiver Aufbau des PV-Moduls

Das PV-Modul besteht aus verschiedenen Schichten. Die Deckschicht bildet eine 4 mm dicke Glasscheibe mit einer Länge von 115 cm und einer Breite von 19 cm, auf die eine Antireflektions-Folie aufgebracht wurde. Hinter dem Glas liegen sieben ca. 0,2 mm starke polykristalline PV-Zellen in den Abmessungen von je 15,6 cm x 15,6 cm (vgl. Abb. 61). Insgesamt hat das PV-Modul eine Dicke von 5-6 mm.

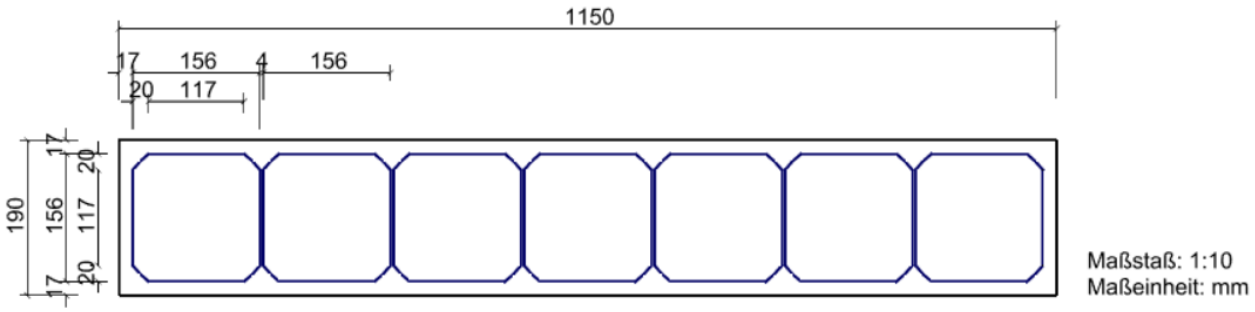


Abb. 61: PV-Modul Detailzeichnung, | Zeichnung: A. Heller, ai:L

Die sieben PV-Zellen des PV-Moduls sind in Reihe miteinander verschaltet. Die seitliche Kontaktierung der Zellen wurde nach hinten geklappt, sodass sie in der Front nicht mehr sichtbar ist. Ein diesbezüglicher Test wurde vom Projektpartner Solar World durchgeführt (vgl. Abb. 62).

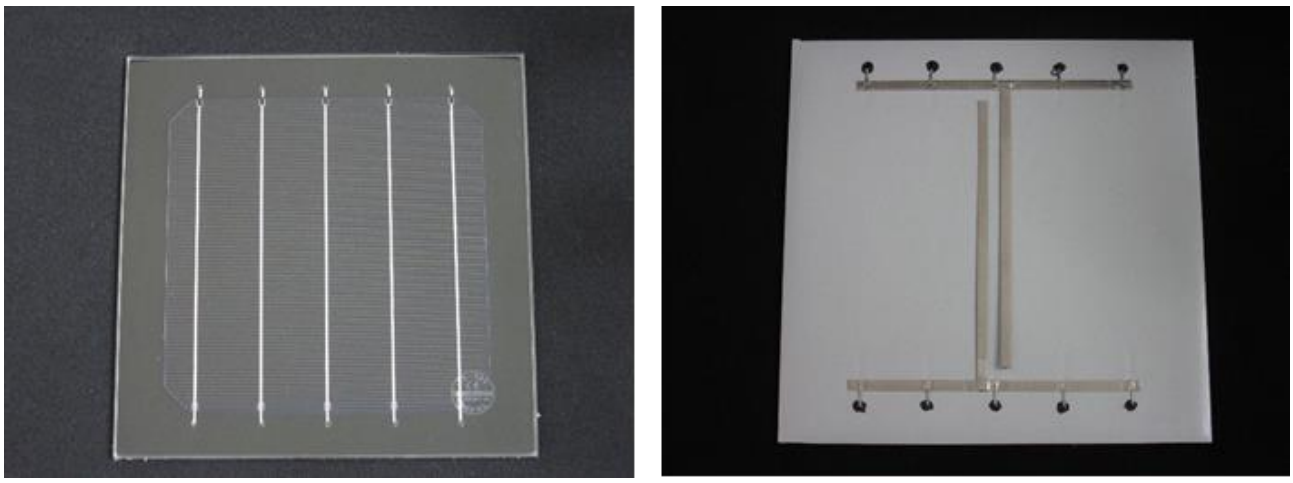


Abb. 62: Rückseitig kontaktierte PV-Zelle | Fotos: H. Hahn, Solar World GmbH

Zum Schutz der Zellen wurde rückseitig eine Folie auflaminiert. In der Front ist die Folie schwarz, sodass ein homogenes Bild von Zelle und Rand entsteht. Das PV-Kabel wurde rückseitig an einen Kontaktierungstreifen angelötet, der aus der Folie herausschaut.
Bei der Verwendung polykristalliner PV-Zellen kann mit einer Leistung von ca. 120 bis 170 Wp/m² und einem Wirkungsgrad von 12 bis 17 % (abhängig vom ausgewählten Produkt) gerechnet werden. Dies bedeutet bei einer Fläche von 0,07 m² (7 x 0,01 m²) pro Modul eine Maximalleistung von 8,4 bis 11,9 Wp.

5.2 Konstruktiver Aufbau des Fassaden-Basismoduls

Das Basismodul besteht aus einer Aluminiumverbundplatte, welche durch Faltung in die gewünschte Form gebracht wurde. Die Faltungen waren möglich, da die Verbundplatte zuvor rückseitig eingefräst wurde, wodurch präzise Faltlinien entstanden. Im gefalteten Zustand weist das Fassaden-Basismodul von der linken bis zur rechten Ecke eine Breite von 289 cm und eine Höhe von insgesamt 75 cm auf. Die

Aussparung für das PV-Modul ist in den Abmessungen 20 cm x 116 cm ausgeführt (vgl. Abb. 63), hier wird das PV-Modul nachträglich eingesetzt. Bei der Entwicklung der Form war darauf zu achten, dass bei den abgewickelten Flächen keine Überschneidungen entstehen. Die Zeichnung der abgewickelten Flächen wird vom Metallbauer verwendet, um den vollautomatischen Zuschnitt inklusive der Fräsungen und Lochbohrung zu programmieren. Eine beispielhafte Abwicklung des Fassadenmoduls ist unter Punkt 5.6.1, Abb. 85 dargestellt.

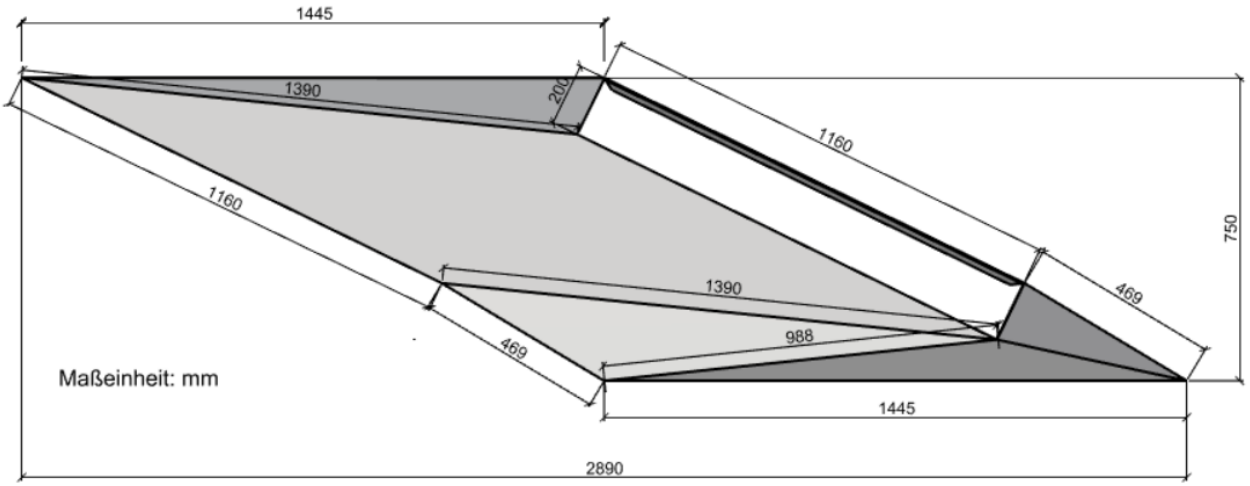


Abb. 63: Zeichnung vom gefalteten Fassaden-Basismodul, Vorderseite | Grafik: A. Heller, ai:L

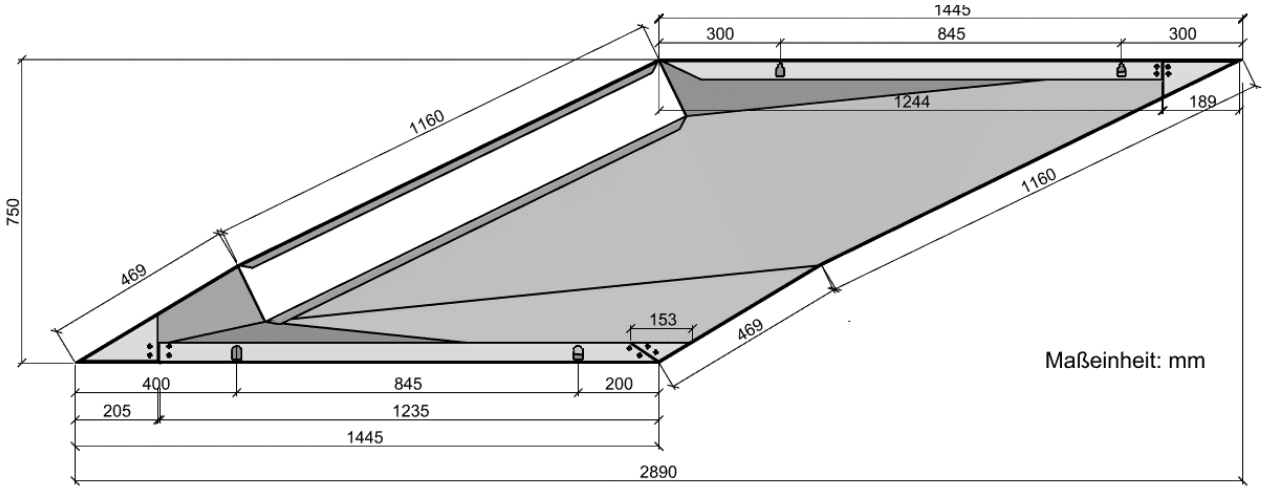


Abb. 64: Zeichnung vom gefalteten Fassaden-Basismodul, Rückseite | Grafik: A. Heller, ai:L

Die Befestigung des Elements erfolgt durch ein Schlüssellochsystem. Die dafür notwendigen Schlüssellöcher werden direkt bei der Produktion des Basiselementes eingefräst und sind in der Rückansicht des Basismoduls in Abb. 64 erkennbar. Das Befestigungssystem des Elementes ist noch einmal detailliert unter Punkt 5.5 beschrieben.

In der Rückansicht des Basismoduls (Abb. 64) ist zudem erkennbar, dass einige Laschen miteinander verbunden sind: Das Element gewinnt nach der Faltung der Aluminiumverbundplatte erst durch die rückseitig vernieteten Verbindungsstücke an Steifigkeit. In der linken Abbildung (Abb. 65) ist beispielhaft das Versteifungssystem einer Ecke abgebildet. Zu sehen ist, dass von oben ein Dreiecksschenkel nach unten und von unten ein Schenkel nach oben geklappt wird. Die beiden Platten werden durch ein rückseitig angebrachtes Verbindungsstück aus Edelstahl oder Aluminiumverbundplatte mit jeweils zwei Nieten miteinander verbunden.

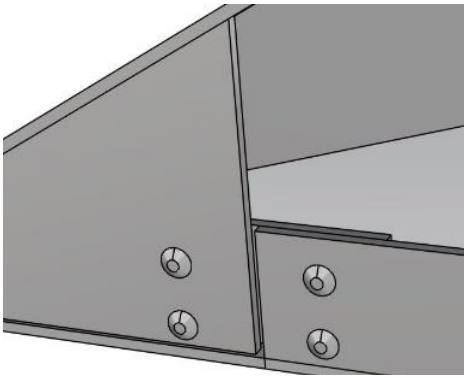


Abb. 65: Detail der rückseitigen Versteifung des Basismoduls | Grafik: A. Heller, ai:L

5.3 Fügen von Photovoltaik- & Basismodul

Ein Element besteht jeweils aus dem Grundfaltelement mit nach innen gefalteter justierbarer Aufnahme, einem Einsatzrahmen und der PV-Lamelle. Einsatzrahmen und PV-Lamelle werden über eine Klebeverbindung miteinander verbunden. Anschließend wird mit einer Schraubverbindung an acht Punkten eine Verbindung mit dem Fassadenelement hergestellt. Die aus dem Modul herausragenden PV-Kabel werden mit den anderen PV-Modulen zu Strings verschaltet. Hinter jedem Modul sitzt eine PV-Anschlussdose, in der sich die Bypass-Dioden befinden. In der folgenden Abbildung ist das gefügte PV-Fassadenelement, bestehend aus einer gefalteten Aluminiumverbundplatte und einem PV-Modul, zu sehen. Zwischen PV-Modul und Metallelement ist eine Fuge von 5 Millimetern eingeplant. Sie wird mit schwarzem Silikon verschlossen.

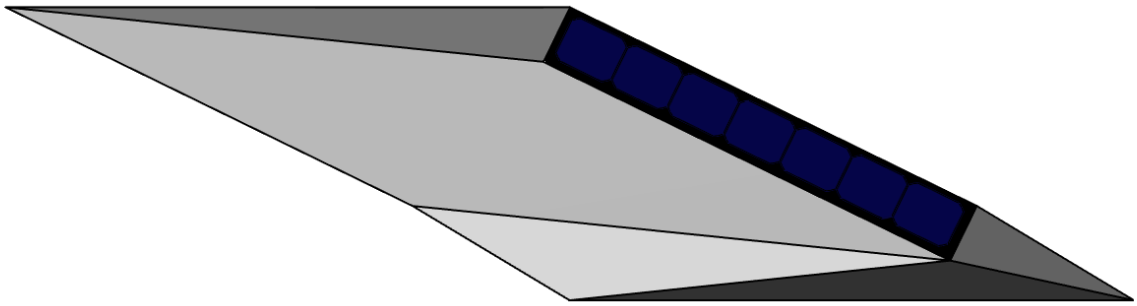


Abb. 66: PV-Fassadenelement, bestehend aus einer gefalteten Aluminiumverbundplatte und einem PV-Modul Grafik: A. Heller, ai:L

Die gefrästen und zugeschnittenen Aluminiumverbundplatten können entweder auf der Baustelle gefaltet und vernietet oder noch im Werk zusammengebaut werden. Erfolgt die Faltung im Werk, kann auch das PV-Modul direkt eingesetzt werden. Auf der Baustelle wird dann das komplette Fassadenelement in die Fassade eingehängt (Befestigungssystem siehe Punkt 5.5) und mit den anderen Elementen verschaltet. Vorteilhaft ist bei dieser Variante, dass eine präzise Montage unter gleichbleibenden Bedingungen möglich ist. Nachteile sind die ggf. höheren Transportkosten sowie die Gefahr von Transportschäden. Wird das Element erst auf der Baustelle zusammengebaut, erhöht sich die Gefahr von Montageungenauigkeiten.

5.4 Eigenschaften der Einzelkomponenten und deren Zusammenspiel

Wärme und Feuchteschutz

Der winterliche Wärmeschutz wird durch eine Dämmschicht hinter der vorgehängten hinterlüfteten Fassade erreicht. Der sommerliche Schutz vor Überhitzung kann durch die Luftschicht hinter den Fassadenelementen sichergestellt werden. Die von unten einströmende kalte Luft wird durch die Wärmeabgabe der PV-Module und der Fassadenmodule aufgeheizt und steigt erwärmt empor (vgl. Abb. 67). Durch den sogenannten Kamineffekt wird die Außenwand gekühlt und eventuelle Feuchtigkeit in der Dämmebene, die durch das Eindringen von Schlagregen oder die Bildung von Kondenswasser entstanden ist, ausgetrocknet.

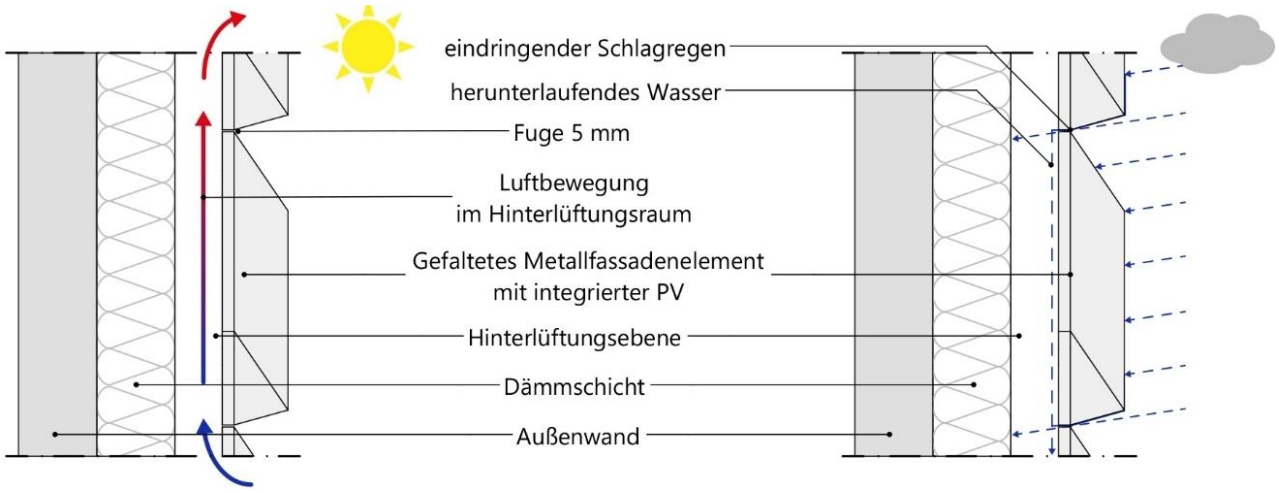


Abb. 67: Wärme und Feuchteschutz der Fassade | Grafik: S. Knechtges, ai:L

Temperaturverhalten (Ausdehnungsverhalten)

Photovoltaik-Module

Photovoltaikmodule wandeln große Teile der einfallenden Solarenergie in Wärme um. Nur 10-20 % werden in elektrische Energie umgewandelt. Daher können sich Solarzellen im Sommer auf bis zu 80 °C aufheizen. In der umgesetzten Metall-PV-Fassade werden kristalline Siliziumzellen verwendet, die pro Grad Celsius Temperaturerhöhung eine fast lineare Wirkungsgradreduzierung um 0,4 % verzeichnen. Die Nennbetriebstemperatur liegt zumeist bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C, Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und Bestrahlungsstärken von 800 W/m² (Siman & Nicolo, 2009, S. 40). Entsprechend muss eine ausreichende Kühlung der PV-Komponenten, wie sie durch die vorgeschlagene Hinterlüftung erfolgen kann, sichergestellt werden.

Metallfassade

Die eingesetzten Aluminiumverbundplatten von Alucobond weisen bei einem Temperaturunterschied von 100 Kelvin eine Ausdehnung von 2,4 mm/m auf. Die maximale Aufheiztemperatur der Platten beträgt 75 °C, wobei sie im Werk bei ca. 15 °C zum Fassadenelement zusammengebaut werden. Dies bedeutet, dass rein rechnerisch eine Fuge von mindestens 1,44 mm pro Meter verbautem Aluminium berücksichtigt

werden muss. Angewandt auf das Fassadenelement bedarf es einer Dehnungsfuge von 2,16 mm zur PV-Lamelle, die mit eingeplant werden muss. Zur Sicherheit wurde eine Fuge von 5 mm gewählt, da sich auch das PV-Glas ausdehnen kann und Maßgenauigkeitstoleranzen berücksichtigt werden müssen.

Wartung

Die Wartung des Fassadenelementes nach der Inbetriebnahme ist nicht unbedingt nötig, jedoch empfehlenswert, um die bestmögliche Leistung der Anlage sicherzustellen. Dazu sollte ein Wartungsplan seitens des Planers aufgestellt werden. Inbegriffen ist eine monatliche Prüfung und Protokollierung der elektrischen Leistungen. Zudem sollten jährliche Sichtprüfungen durchgeführt werden und die PV-Module gegebenenfalls gereinigt werden, sodass die Leistung nicht aufgrund von Verschmutzung verringert wird.

Revisionierbarkeit der Photovoltaik

Zur Revisionierung eines PV-Moduls im Fassadenkontext wird von einem Hubwagen aus zunächst ein Fassadenelement ausgehängt, der PV-Stecker getrennt, die Silikonfuge um das PV-Modul entfernt und anschließend die Schraubverbindung auf der Basismodulinnenseite gelöst, damit der Einsatzrahmen mit aufgeklebtem PV-Modul entfernt werden kann. Anschließend wird ein neues PV-Modul auf einem neuen Einsatzrahmen in umgekehrter Reihenfolge montiert, mit schwarzem Silikon versiegelt und verschaltet. Alternativ wäre eine noch zu entwickelnde Klickverbindung denkbar, die sich auf dem Einsatzrahmen oder Basismodul befindet und das PV-Element aufnimmt. Somit wäre die Demontage des gesamten Fassadenelementes nicht mehr notwendig.

5.5 Fassadenbefestigung

Das gefaltete, PV-integrierte Metallelement kann als vorgehängte hinterlüftete Fassade auf unterschiedliche Arten an einer Unterkonstruktion angebracht werden. Für das Forschungsprojekt wurde auf Standard-Befestigungssysteme zurückgegriffen und diese teilweise angepasst: Bei der ersten Befestigungsvariante wurde das Fassadenelement nach dem Schlüsselloch-Prinzip auf eine Spezialmutter gehängt, wobei zwei verschiedene Fassadenbefestigungssysteme miteinander kombiniert wurden. In der Alternativvariante wir das Modul durch ein Agraffensystem an die Fassade gesetzt. Diese Variante basiert auf einem Standard-Agraffensystem für Fassaden, welches eine unkomplizierte Anbringung verspricht, jedoch höhere Materialkosten verursacht.

Variante Schlüsselloch & Spezialmuttern

Diese Variante kombiniert Teile des Zykon-Plattenanker-Systems von Fischer (FZP-II-VS) mit einem in die Rückseite des Basismoduls eingefrästen Schlüssellochausschnitt. Vom Fischer-System wird die Spezialmutter (vgl. Abb. 68) genutzt, in welche das Fassadenelement eingehängt werden kann. Standardmäßig wird die Mutter mit dem Plattenanker in der anzubringenden Platte befestigt und in die Unterkonstruktion eingehängt. Für die SOLAR*shell*-Fassade wird das System umgedreht und die Spezialmutter an der Unterkonstruktion befestigt, in die das Fassadenelement eingehängt werden kann. Die notwendige Aussparung in Form eines Schlüssellochs wird direkt in die Aluminiumverbundplatte eingefräst (vgl. Abb. 69), sodass eine weitere Befestigungskomponente nicht notwendig ist (vgl. Abb. 70).

Abb. 68: Fischer Spezialmutter zum Zykon-Plattenanker FZP-II-VS | Foto: S. Huth, ai:L

Abb. 69: Aluminiumverbundplatte mit eingefrästem Schlüsselloch | Foto: S. Huth, ai:L

Abb. 70: Zusammenspiel zw. Schlüsselloch & Spezialmutter | Foto: S. Huth, ai:L

Der Fassadenaufbau ist in den nachfolgenden Darstellungen (Abb. 71 bis Abb. 74) gezeigt. Zu erkennen ist, dass die Fassadenelemente jeweils oben und unten in die Spezialmuttern eingehängt werden, welche an der horizontalen Lattung befestigt sind. Die Elemente werden um eine Fugenbreite von jeweils 5 mm versetzt aufgehängt. Die Spezialmuttern sind auf eine M6-Gewindeschraube aufgeschraubt und können zur Tiefenjustierung des Fassadenelements hinein- oder hinausgedreht werden. Zur vertikalen Justierbarkeit ist die Gewindeschraube in einem Langloch mit einer Kontermutter befestigt. Ein sich an der Gewindeschraube befindliches, horizontal verschiebbares Klemmelement ist über die horizontale Konterlattung gestülpt und dient der horizontalen Ausrichtung des Fassadenmoduls. Zur Fixierung wird das Klemmelement nach der Ausrichtung an die horizontale Konterlattung mit Hilfe einer selbstschneidenden Schraube fixiert. Um Klappergeräusche zu vermeiden, wird eine Kunststoffschicht zwischen horizontale Latte und Klemmelement gelegt. Die Vorteile des Systems liegen in seiner Materialeffizienz, da das Schlüsselloch in die Aluminiumverbundplatte eingefräst ist und der Einhängebolzen wenig Material benötigt sowie in der Möglichkeit, eine Horizontal-, Vertikal- und Tiefenjustierung des Fassadenelements vorzunehmen. Nachteilig für die praktische Einsetzbarkeit ist jedoch, dass die Lösung als Kombination verschiedener Systeme keine gültige Zulassung besitzt und entsprechend nicht auf dem Markt verfügbar ist. Zudem müssen die M6-Gewindestangen händisch angeschraubt werden, was zu höheren Errichtungskosten führt.

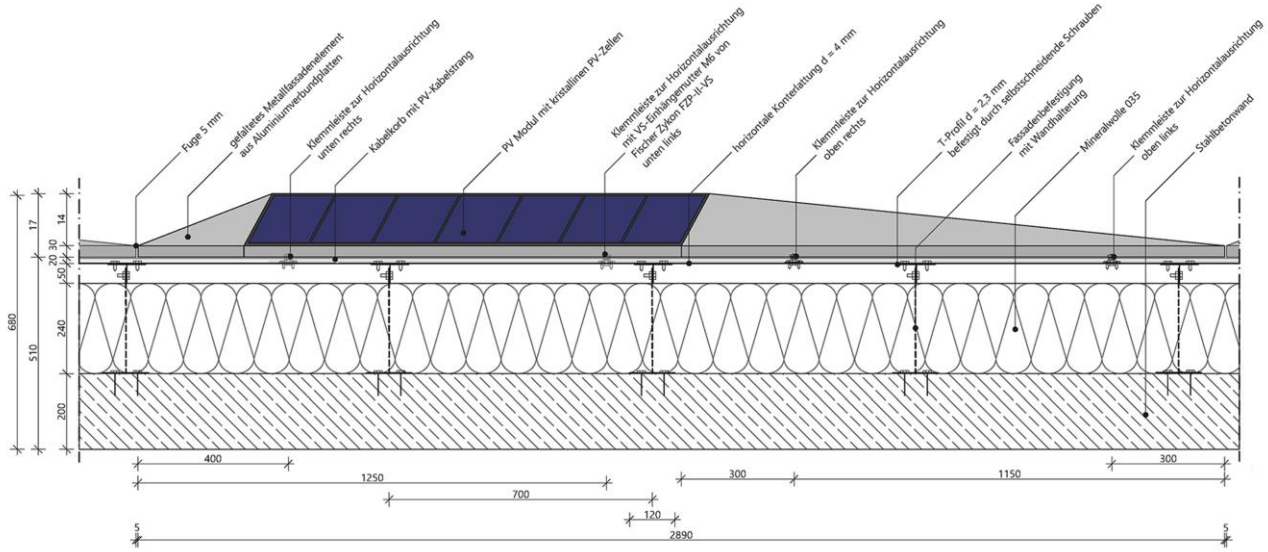


Abb. 71: Befestigungsvariante Spezialmuttern, Horizontalschnitt, M 1:20 | S. Knechtges, ai:L

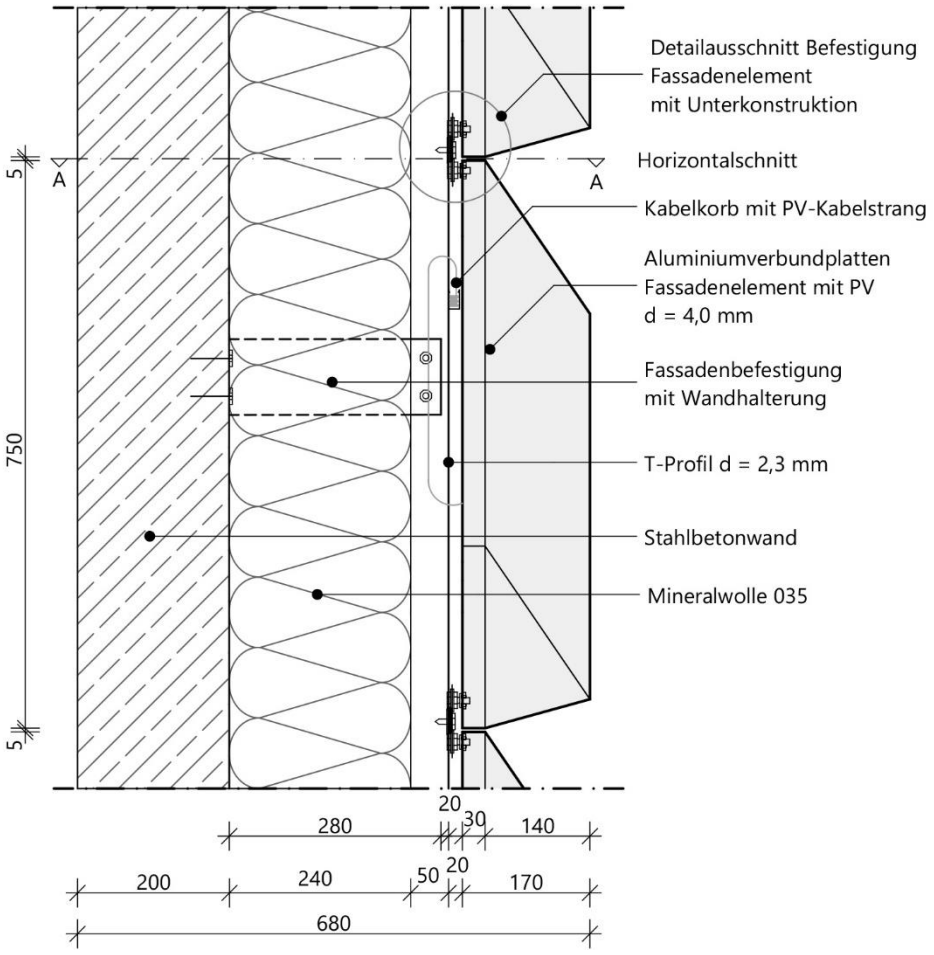


Abb. 72: Befestigungsvariante Spezialmuttern, Vertikalschnitt, M 1:10 | S. Knechtges, ai:L

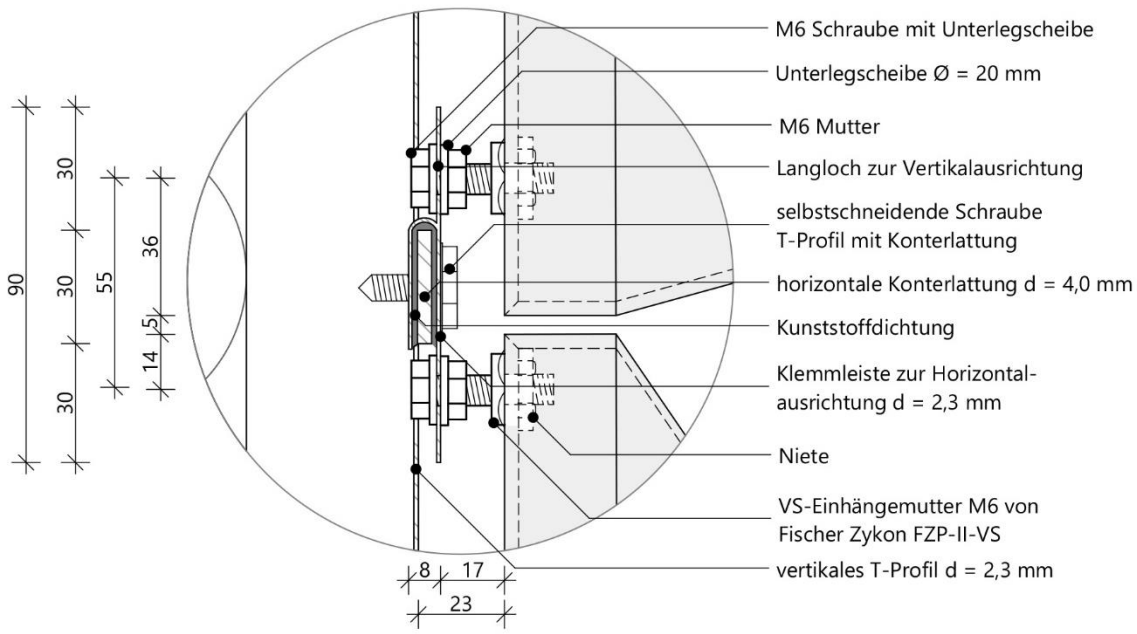


Abb. 73: Befestigungsvariante Spezialmuttern, Detail, M 1:2 | S. Knechtges, ai:L

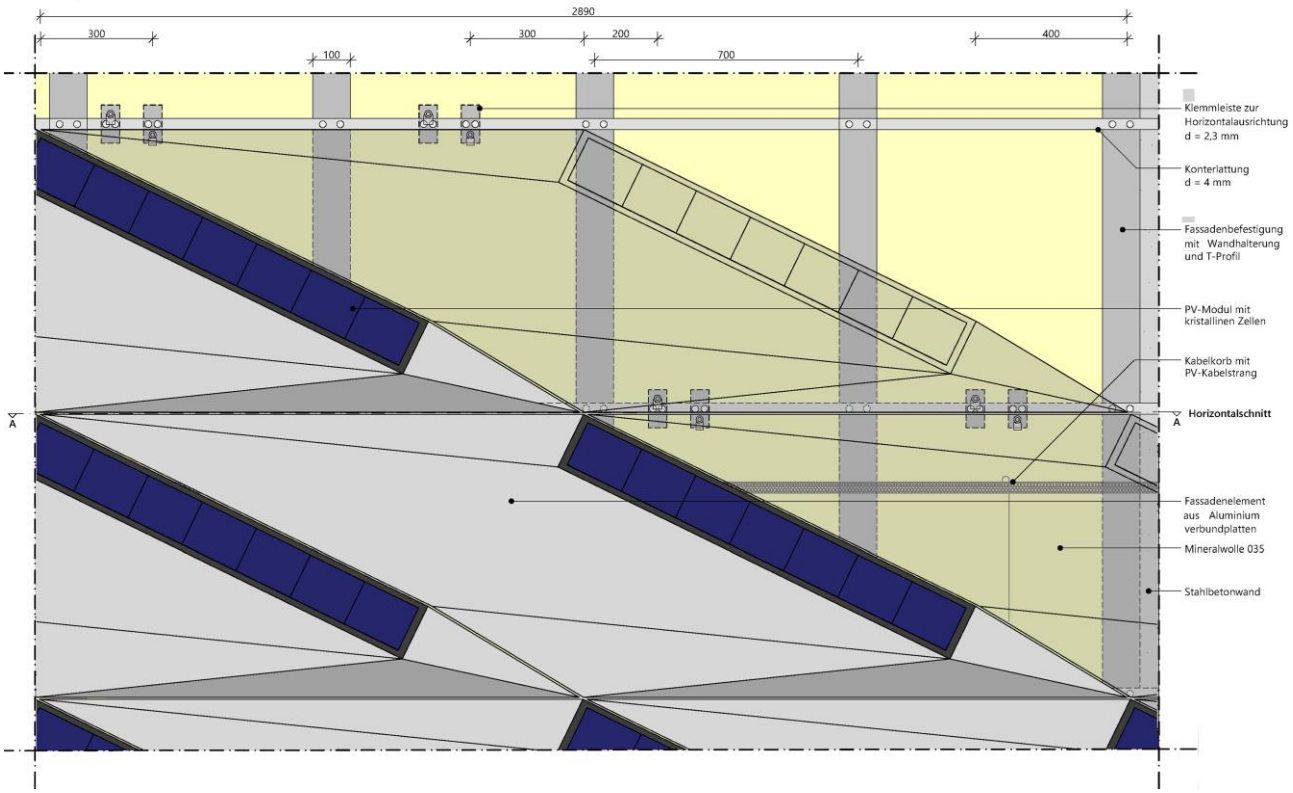


Abb. 74: Befestigungsvariante Spezialmuttern, Ansicht, M 1:20 | S. Knechtges, ai:L

Variante Agraffensystem

Bei dieser Befestigungsvariante des Fassadenelements wird auf ein Standard-Agraffensystem zurückgegriffen. Die Agraffen werden als Horizontallattung mittels selbstschneidenden Schrauben an der Unterkonstruktion fixiert, die Gegenstücke am Fassadenelement befestigt. Zur Positionsjustierung kann das Element nach dem Einhängen horizontal verschoben werden. Zur vertikalen Ausrichtung und Fixierung der Position wird eine Fixierschraube an der Oberseite der Agraffe eingesetzt. Vorteilhaft an Standard-Agraffensystemen ist ihre Verfügbarkeit am Markt, eine schnelle Montage sowie ihre Unanfälligkeit für Montagefehler. Als nachteilig muss der vergleichsweise hohe Preis genannt werden, wodurch höhere Materialkosten anfallen. Die folgenden Zeichnungen Abb. 75 und Abb. 76 zeigen einen Vertikalschnitt sowie ein Detail dieses Befestigungssystems.

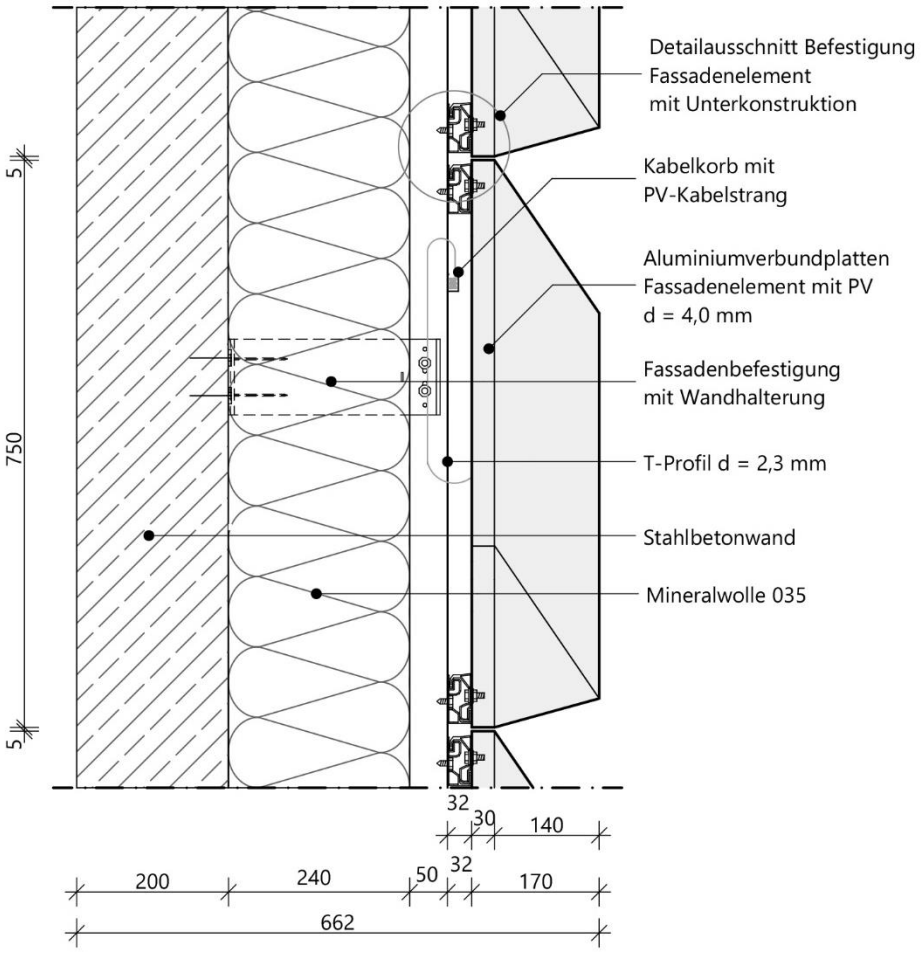


Abb. 75: Befestigungsvariante Agraffen, Vertikalschnitt, M 1:10 | S. Knechtges, ai:L

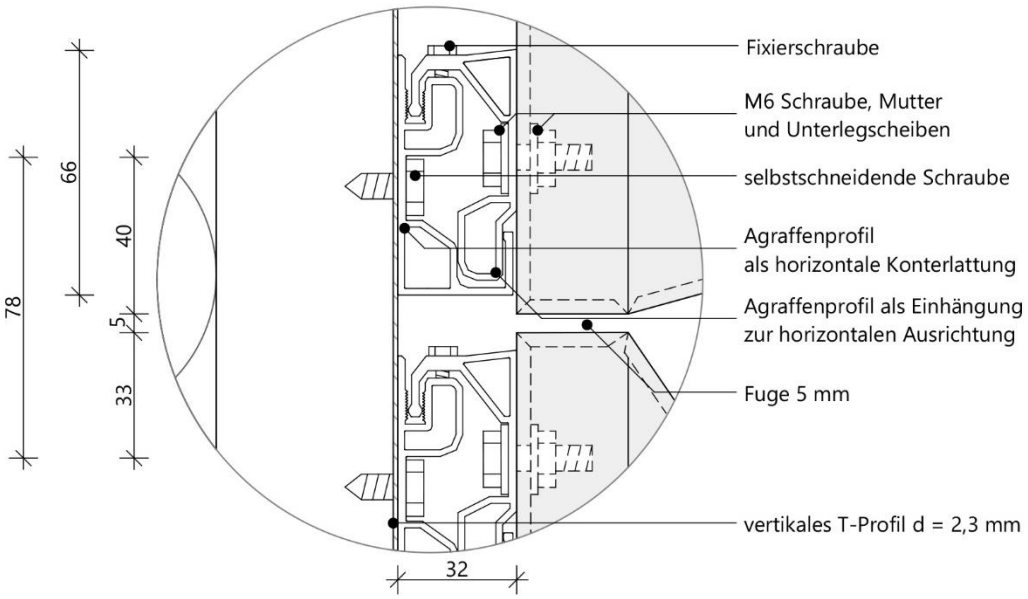


Abb. 76: Befestigungsvariante Agraffen, Detail, M 1:2 | S. Knechtges, ai:L

5.6 Demonstrator

Die im Projekt entwickelte Lösungsvariante „gefaltete Metallfassade mit integrierter Photovoltaik" wurde in einem Demonstrator umgesetzt. Er zeigt einen Ausschnitt der entwickelten 3D-Metallfassade an einer west- und südausgerichteten Gebäudeecke im Maßstab 1:2 (vgl. Abb. 77). Er demonstriert die Verschmelzung von architektonischer Ästhetik und Ertragsmaximierung der PV durch Form- und Ausrichtungsoptimierung der Fassade, wie sie mit parametrisch-generativen Entwurfsmethoden erreicht werden kann.
Der Demonstator, der in den Abmessungen 3,00 x 1,90 x 0,37 m (B x H x T) umgesetzt wurde, integriert die PV-Komponenten so in die Fassade, dass Materialität und Haptik der eingesetzten Aluminium-Verbundplatten erhalten bleiben und die PV die Erscheinung nicht dominiert. Das realisierte Großmuster gibt damit einen Ausblick darauf, wie zukünftige Solarfassaden im Spiel von Material, Optik und Funktion aussehen könnten.

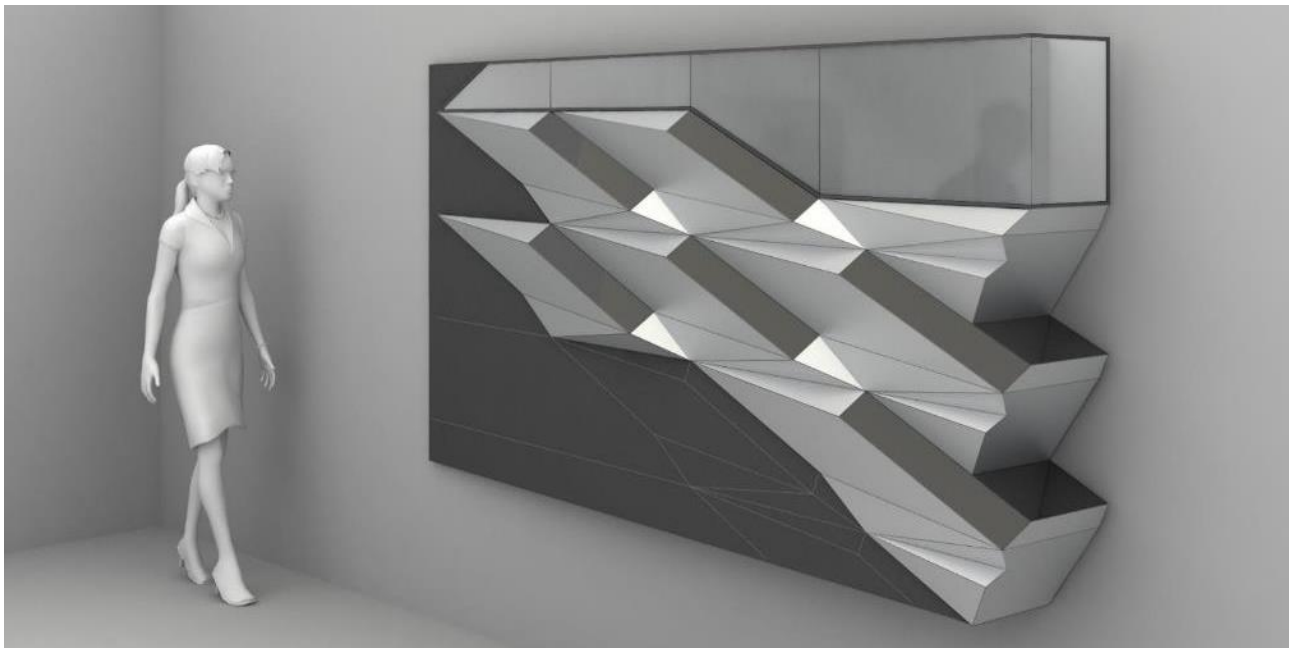


Abb. 77: Entwurfsvisualisierung des SOLAR*shell*-Demonstrators | CGI: A. Heller, F. Schwalbe, ai:L

5.6.1 Demonstratorplanung

Für die Umsetzung des Fassadendemonstrators wurden Ausführungsunterlagen erstellt, die u. a. eine Beschreibung und Positionierung aller zu integrierender Komponenten, Fräspläne, Kabelführungen sowie Befestigungsmittel beinhalteten.

Aufbau des Demonstrators

Der Demonstrator besteht in seinem Grundkorpus aus drei MDF-Boxen, welche zur besseren Transportfähigkeit in den Maßen 1,00 x 1,90 x max. 0,365 m umgesetzt wurden. Die Boxen können mittels Gewindestangen und Flügelmuttern miteinander verbunden werden und dienen den Metallfassadenelementen als Unterkonstruktion (siehe Abb. 78). Für die Fassade selber wurden zwei Elementtypen entwickelt. Ein solar optimiertes Westfassaden-Element und ein optimiertes Südfassaden-Element, welches gleichzeitig

die Eckausbildung übernimmt. Alle neun Elemente sind miteinander verschaltet und somit funktionstüchtig. Bei ausreichender Bestrahlung mit natürlichem oder Kunstlicht leuchtet ein LED-Ring im „O“ des SOLAR*shell*-Schriftzugs. Zudem kann über einen integrierten USB-Anschluss beispielsweise ein Mobiltelefon geladen werden. Oberhalb der Fassadenelemente wurden schwarze Acrylplatten vorgesehen, die den Sitz einer möglichen Fensterfläche andeuten. Die Verkabelung und Steuerung sitzen auf der Demonstratorückseite (siehe Abb. 79). Um bei freier Aufstellung des Demonstrators ein mögliches Kippen zu verhindern, können rückseitig zudem mobile Gewichte in den Korpus integriert werden.

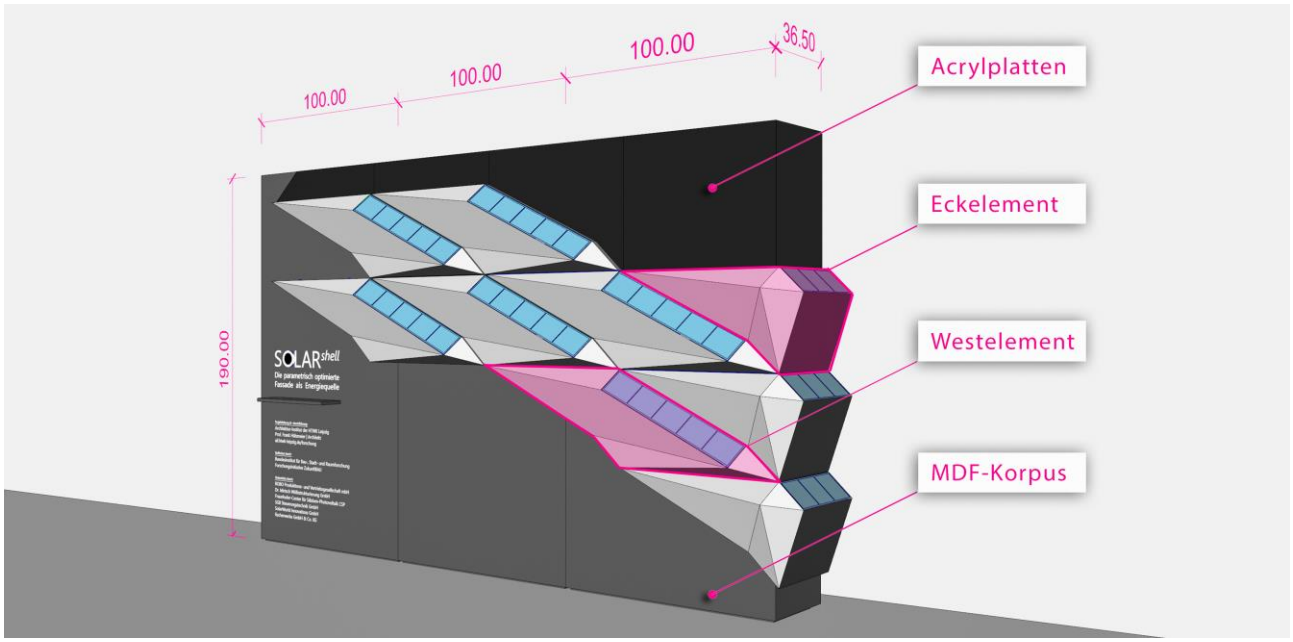


Abb. 78: Frontansicht des Demonstrators | Grafik: A. Heller, ai:L

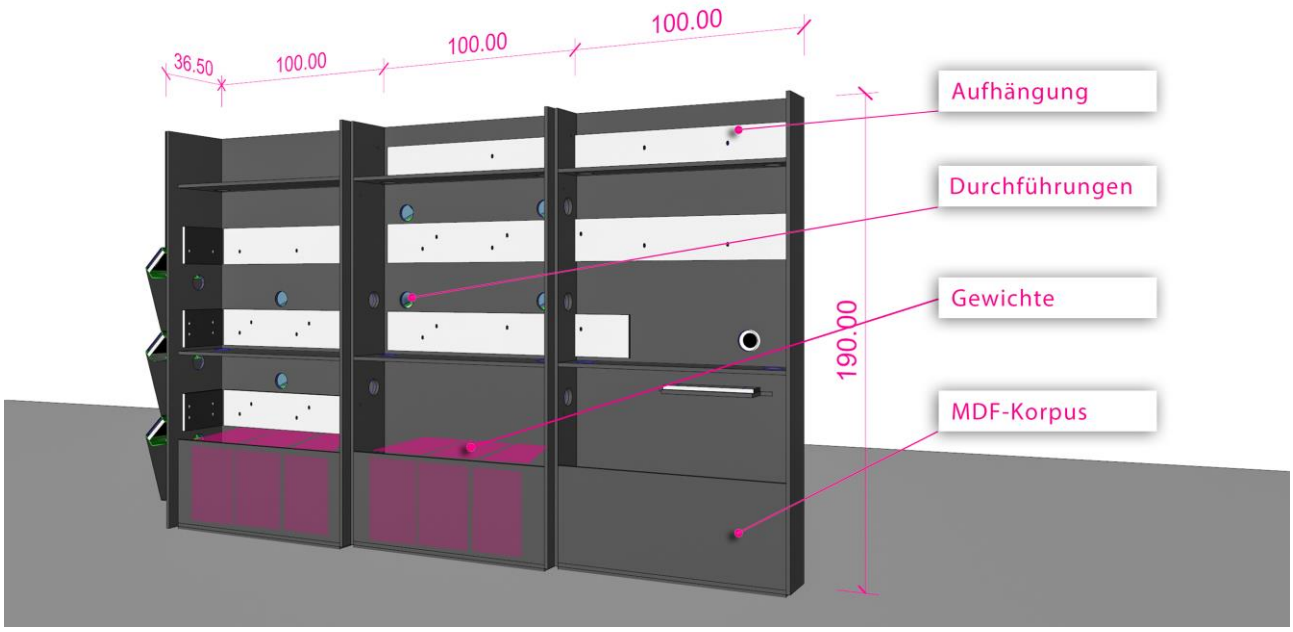


Abb. 79: Rückansicht des Demonstrators | Grafik: A. Heller, ai:L

Werksplanung Korpusboxen

Auf Grundlage des 3D-Modells wurde eine detaillierte Werksplanung für die drei Korpusboxen mit allen Durchführungspunkten, der Elementaufhängung sowie den Verbindungsmitteln erstellt (Abb. 80 zeigt beispielhaft die Werkplanung von Korpus 1).

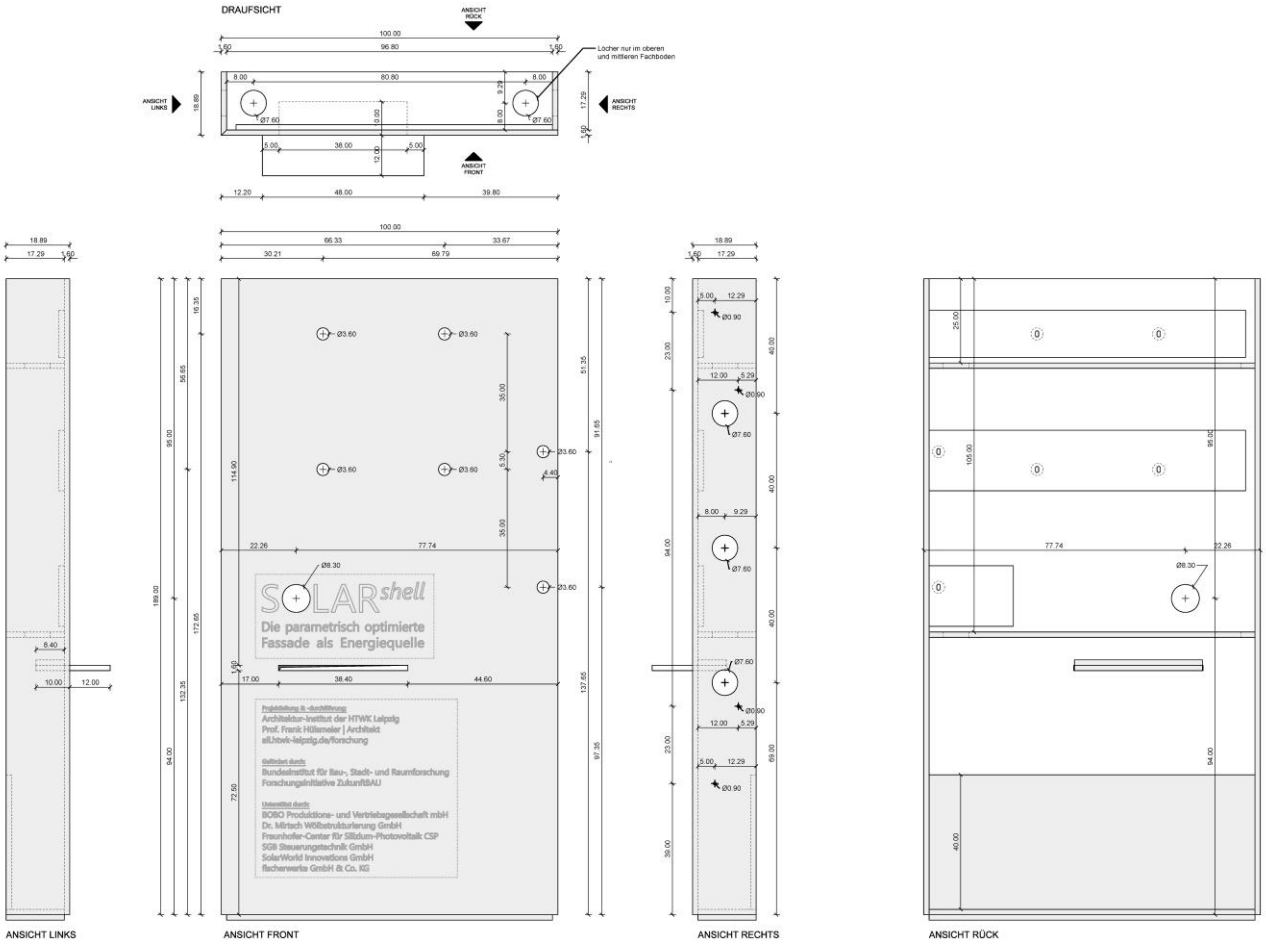


Abb. 80: Werksplanung Korpusbox 1 | Zeichnung: S. Huth, ai:L

Fassadenelemente Westseite

Abb. 81 und Abb. 82 zeigen den Aufbau der Westelemente. Ein Element besteht jeweils aus dem Grundfaltelement mit nach innen gefalteter justierbarer Aufnahme, einem Einsatzrahmen und der PV-Lamelle. Einsatzrahmen und PV-Lamelle werden über eine Klebeverbindung miteinander verbunden. Anschließend wird mit einer Schraubverbindung an acht Punkten eine Verbindung mit dem Fassadenelement hergestellt. In der Rückansicht sind die Aufhängung und Elementaussteifung dargestellt. Die vorgesehene Schlüssellochaufhängung ermöglicht eine unkomplizierte Montage bei sicherem Sitz der Elemente an der Unterkonstruktion. Die Aussteifung der Einzelelemente erfolgt jeweils über eine rückseitige Vernietung in den Eckbereichen.

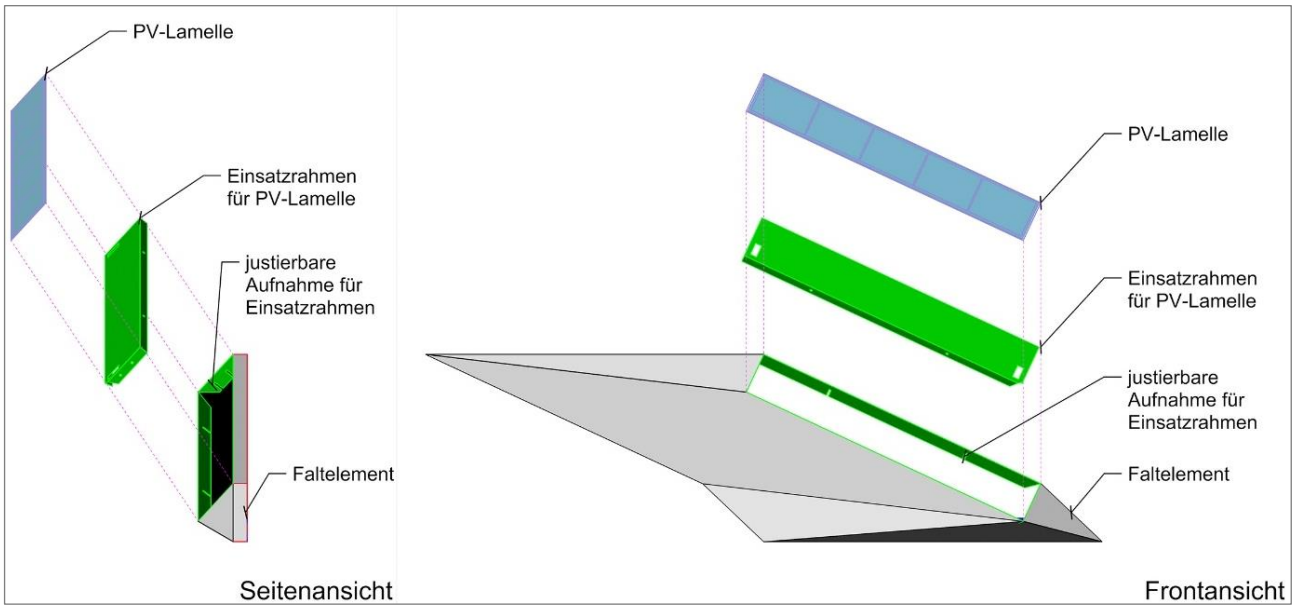


Abb. 81: Aufbau des Westfassaden-Elementes, Front- & Seitenansicht | Grafik: A. Heller, ai:L

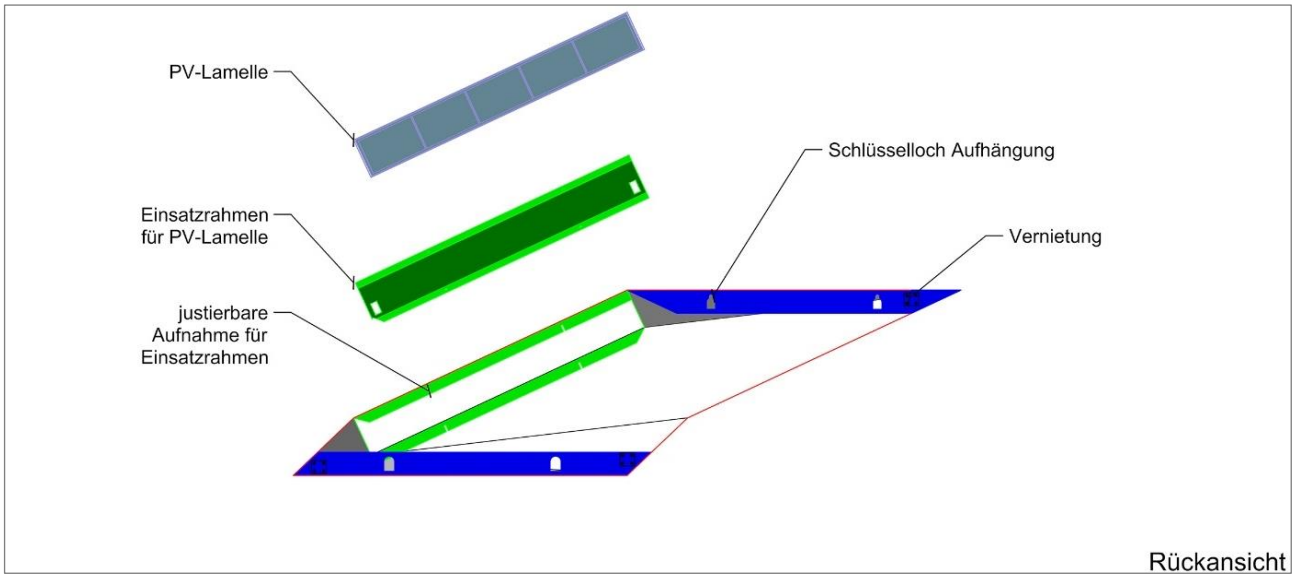


Abb. 82: Aufbau des Westfassaden-Elementes, Rückansicht | Grafik: A. Heller, ai:L

Fassadenelemente Südseite

Die Grundkomponenten der Südfassaden-Elemente sind prinzipiell identisch mit dem der Westfassaden-Elemente (vgl. Abb. 83 und Abb. 84), einzig die Ausbildung von Faltelement und PV sowie die Eckausbildung der Fassade (geringfügige Anpassung der Aufhängung) sind unterschiedlich. Für die Montage über Eck wurde auf der kurzen Seite ein Langloch zum Einführen der Aufhängung geplant.

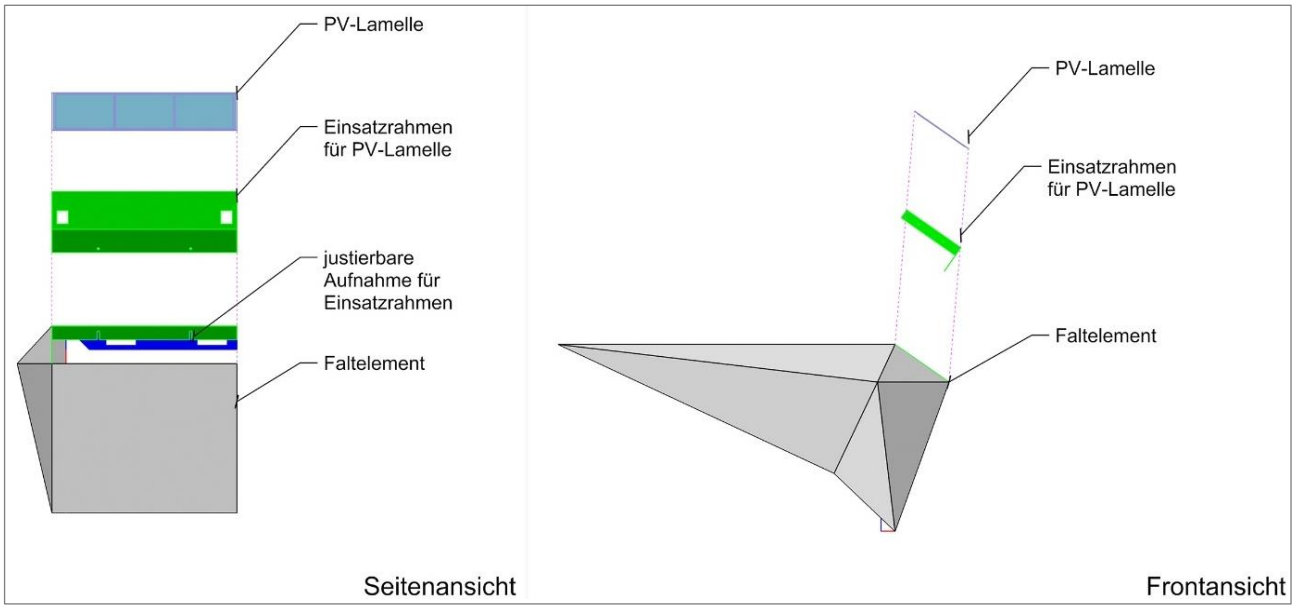


Abb. 83: Aufbau des Südfassaden-Elementes, Front- & Seitenansicht | Grafik: A. Heller, ai:L

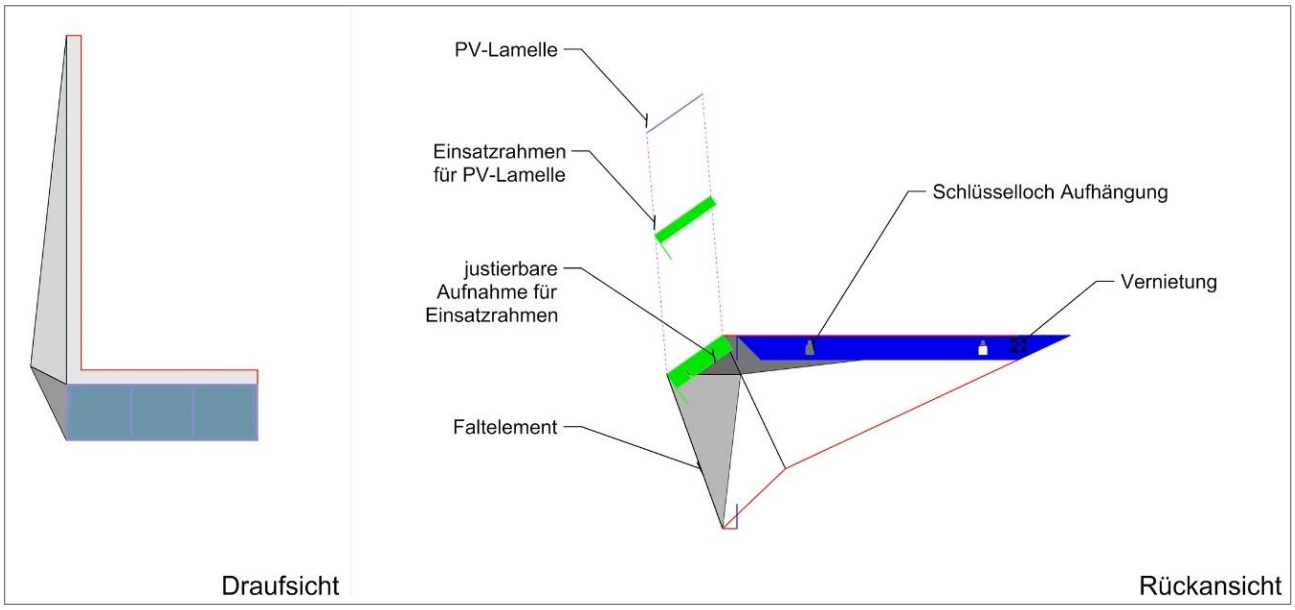
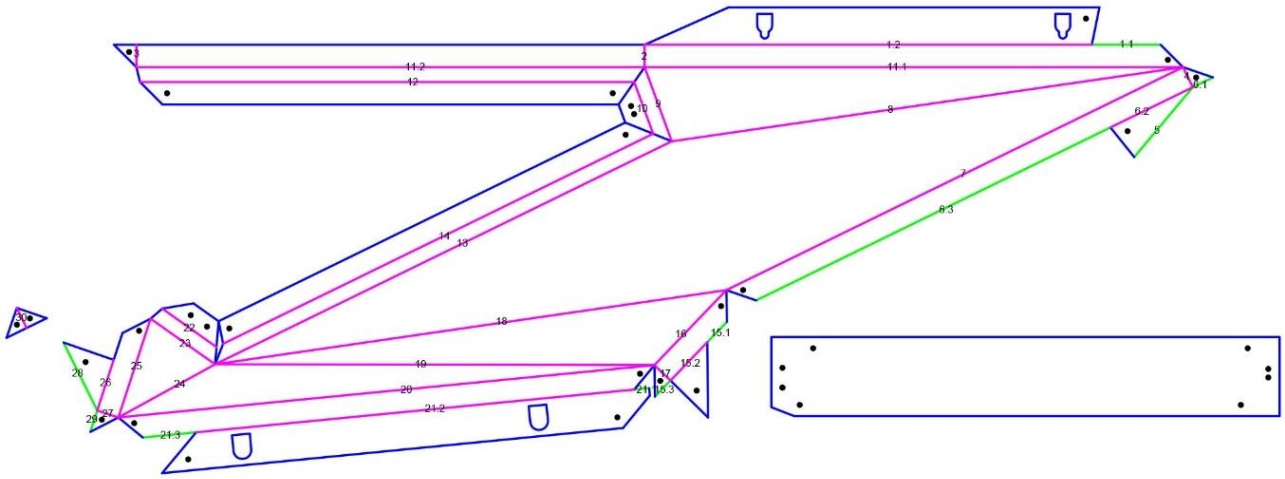


Abb. 84: Aufbau des Südfassaden-Elementes, Drauf- & Rückansicht | Grafk: A. Heller, ai:L

Fräsdaten der Metallelemente

Die folgende Zeichnung (Abb. 85) zeigt beispielhaft für die restlichen Planunterlagen eine Abwicklung des Westfassaden-Elementes. Jeder Fräskante wurde darin ein entsprechender Fräswinkel zugeordnet. Die digitale Planung kann vom Metallbauer nach einer Übersetzung in den „Maschinencode" direkt an die Fräse übermittelt werden.



Gehrungsfräsung (Winkel siehe Tabelle)

Laserschnitt

Gehrungsfräsung dann Laserschnitt (Winkel siehe Tabelle)

⊗ Bohrung (Ø 5mm)

Kante	Fräswinkel
1.1	90
1.2	90
2	24*
3	20,5*
4	156
5	90
6.1	90
6.2	90
6.3	90
7	74,6*
8	48,8*
9	103,3
10	90
11.1	55,6*
11.2	148
12	90
13	137.4
14	90
15.1	90

Kante	Fräswinkel
15.2	90
15.3	90
16	82,4*
17	44,5*
18	188,7 ** (Innenkante)
19	69,3*
20	15,4*
21.1	90
21.2	90
21.3	90
22	90
23	101,2
24	99,3
25	56,3*
26	90
27	135,5
28	90
29	90
30	200** (Innenkante)

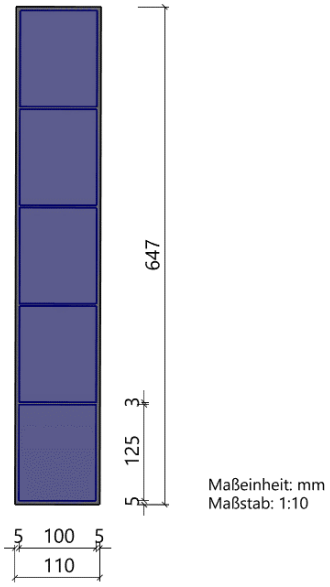
Abb. 85: Zeichnung für den Metallbauer, Rückansicht der Abwicklung inkl. Fräswinkelauflistung | Zeichnung: A. Heller, ai:L

Detailbeschreibung der Photovoltaikmodule
(mit inhaltlicher Unterstützung des Fraunhofer CSP)

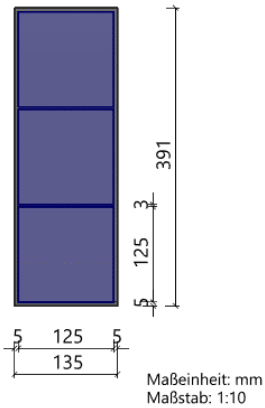
Der Projektpartner Fraunhofer CSP aus Halle/Saale stellte insg. neun PV-Module für den Demonstrator her. Diese waren vom ai:L so geplant, dass sie am Ende form- und oberflächenschlüssig in das Funktionsmuster eingesetzt werden konnten und elektrisch funktionsfähig sind. Wie der gesamte Demonstrator wurden die PV-Module im verkleinerten Maßstab 1:2 hergestellt. Dabei wurden zwei verschiedene Minimodultypen mit Sunpower-Solarzellen und schwarzen Back-sheets als Glas-Folie-Verbünde gefertigt. Die Vorderseite erscheint so in einem homogenen Schwarzblau. Auf der Rückseite wurden elektrische Kontaktierungspads zur elektrischen Verschaltung der Module angebracht.

<u>Modultypen</u>

PV-Modul Typ 1
- 1-er-String, 5-Zell-Anordnung
- Modulabmessung: 647 x 110 mm
- Modulaufbau: Glas-Folie-Modul
- Glas: Standard Walzglas, 3,2 mm
- Backsheet: Feron neoX CPE, schwarz
- Verkapslungsmaterial: Bridgestone EVA Sky S88
- Solarzellen: Supower, lasergeschnitten auf das Zellformat 100 x 125 mm
- Laminationsdruck: 800 mbar
- Modulanzahl: 6 Stück



PV-Modul Typ 2
- 1-er-String, 3-Zell-Anordnung
- Modulabmessung: 390 x 135 mm
- Modulaufbau: Glas-Folie-Modul
- Glas: Standard Walzglas, 3,2 mm
- Backsheet: Feron neoX CPE, schwarz
- Verkapslungsmaterial: Bridgestone EVA Sky S88
- Solarzellen: Supower, lasergeschnitten auf Zellformat 125 x 125 mm
- Laminationsdruck: 800 mbar
- Modulanzahl: 3 Stück



Daten der verwendeten PV-Zellen

Ganze Zelle	Leistungsveränderung durch Beschneiden der Zelle
- Zellgröße: 125 mm x 125 mm - Zellfläche: 1530 mm² - Wirkungsgrad: 20,8 - 22,5 % - Leistung: 3,19 - 3,46 Wp	- Zellgröße: 100 mm x 125 mm - Zellfläche: 1250 mm² - Leistung: 2,61-2,191 Wp - Anmerkung: Die Leistung ist proportional zur Flächenverkleinerung (Verminderung hier um 18,31 %)

Herstellung der Module

Aufgrund der kleinteiligen Sonderformate erfolgte die Modulmontage in manueller Fertigung. So wurden alle Materialien entsprechend der geforderten Außenmaße per Hand konfektioniert und zusammengesetzt. Außerdem erfolgte ein zusätzlicher Zellteilungsprozess der Sunpower-Zellen aufgrund der geforderten Modulabmessungen (125 x 100 mm). In Abb. 86 ist ein Vergleich des Standardzellformats mit der lasergeschnittenen Zelle zu sehen. Abb. 87Abb. 86 zeigt die Rückseite der Solarzellen vor der Lamination. Im Detail sind die verzinnten Cu-Bändchen (1) zur Zell-Zell-Kontaktierung und zur Herausführung eines Lötpads (2) zur späteren Modul-Modul-Verschaltung im Demonstrator zu sehen.

Abb. 86: Vgl. der Zellgrößen zw. Modul Typ 01 & 02
Foto: S. Schindler, Fraunhofer CSP

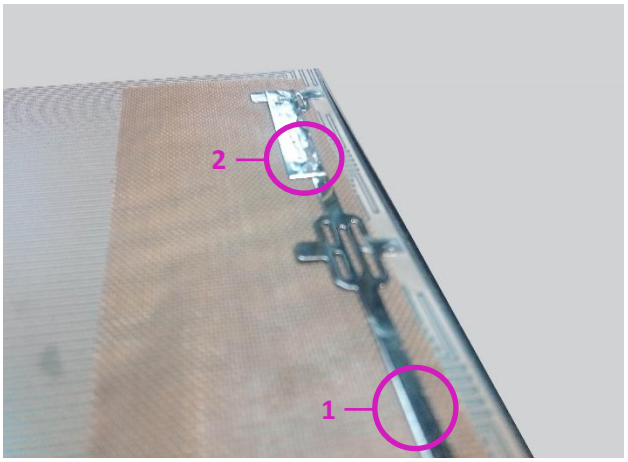


Abb. 87: Detail der elektrischen Kontaktierung der Zelle
Foto: S. Schindler, Fraunhofer CSP

Für die Verkabelung der PV-Zellen kam ein Standard-EVA-Material (Fa. Bridgestone, EVA Sky S88) zum Einsatz. Die Modulvorderseite wurde aus ungehärtetem Walzglas (Fa. Interfloat, SINA) gefertigt, die Modulrückseite besteht aus einem Backsheet-Material mit einer schwarzen Innenseite (Fa. Feron, neoX CPE), sodass das Modul in der Frontansicht einen homogenen schwarz-dunkelblauen Gesamteindruck erhält. Die Lamination erfolgte unter Einhaltung folgender Parameter:

- Laminationstemperatur: 155 °C
- Laminationsdruck: 800 mbar
- Haltezeit: 25 min

Die nachfolgenden Abbildungen Abb. 88 und Abb. 89 zeigen die hergestellten PV-Module. In der Detailaufnahme (Abb. 89) ist zum einen der Kontaktstreifen, auf welchen anschließend die PV-Kabel angelötet wurden, zum anderen die raue Oberfläche des gewalzten Glases zu erkennen.

Abb. 88: PV-Modul Typ 1, Rückseite & Vorderseite | Foto: S. Schindler, Fraunhofer CSP

Abb. 89: PV-Modul Typ 2, Vorder- & Rückseite | Schrägansicht: Modulaufbau mit Kontaktstreifen
Fotos: S. Schindler, Fraunhofer CSP

Verschaltung des Demonstrators

Für die Verschaltung der PV-Lamellen des Demonstrators wurde vom Steuerungstechniker SGB ein Schalt und Steuerungsplan erstellt (vgl. Abb. 90). Die Elemente sind so verschaltet, dass auch bei nicht gleichmäßiger Bestrahlung, aufgrund von Verschattung etc., ein funktionierendes System bestehen bleibt da entsprechend betroffene Elemente überbrückt werden können. Weiterhin ist die Steuerungseinheit (vgl. Abb. 91) in der Lage einen 12V LED-Ring und über eine Wandler eine 5V USB-Buchse zu versorgen. Die maximal ausgelegte Leistung des Demonstrators ist mit 70W anzugeben.

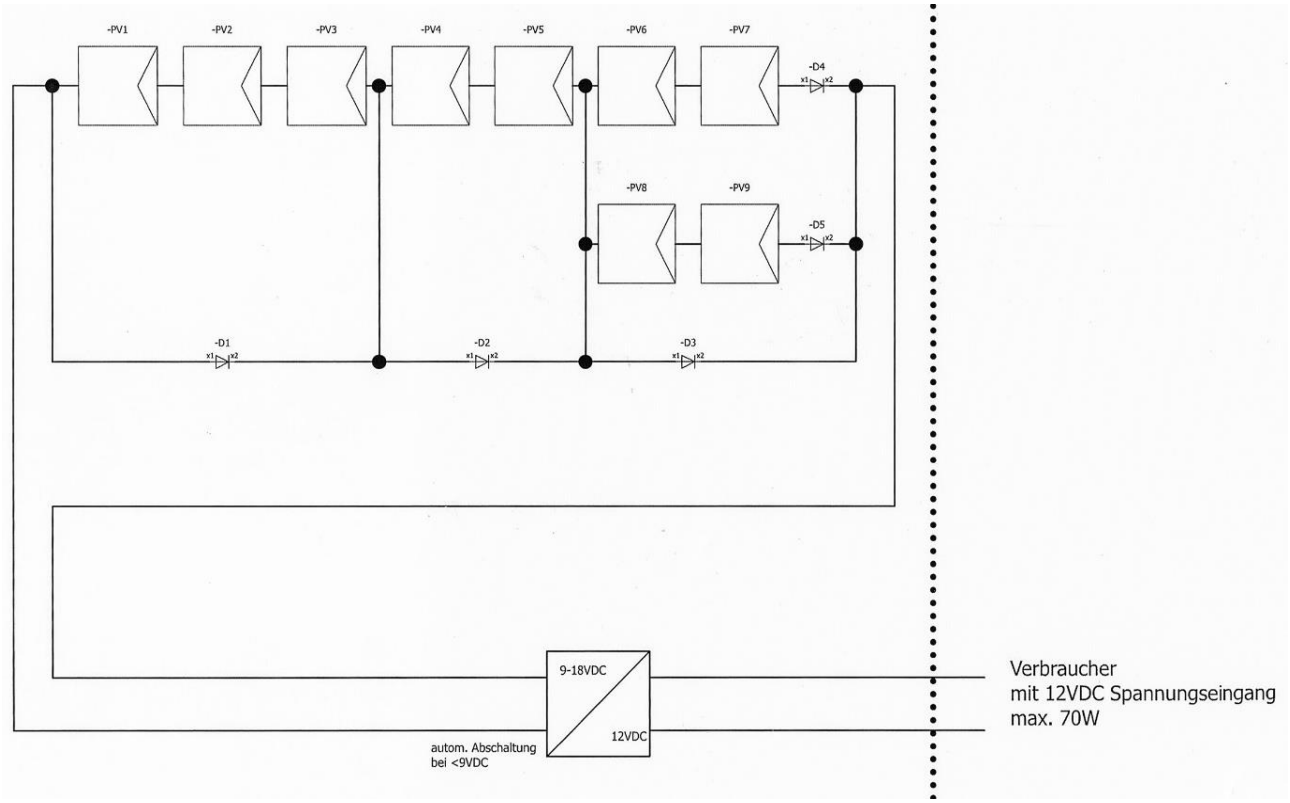


Abb. 90: Verschaltungsplan der PV-Lamellen | Zeichnung: D. van Luong, SGB Steuerungstechnik GmbH

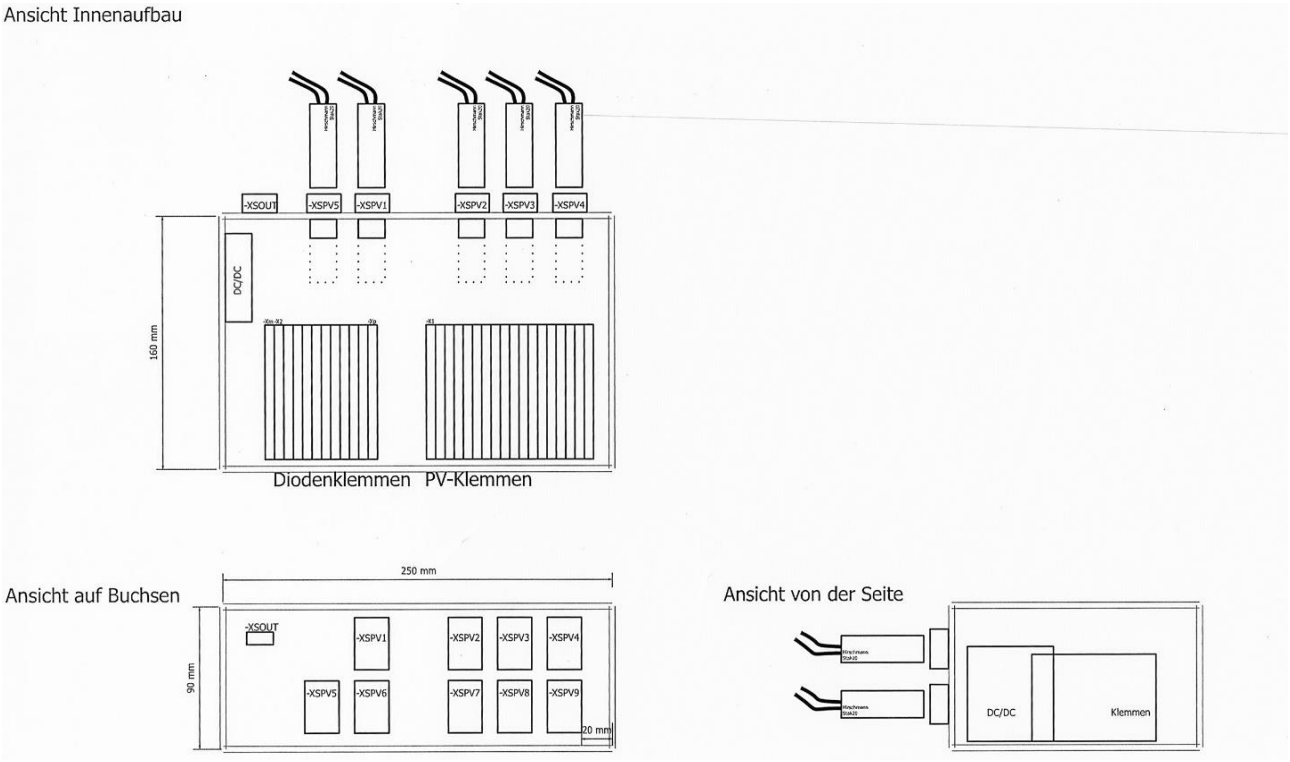


Abb. 91: Aufbau der Schalt- und Steuerungseinheit | Zeichnung: D. van Luong, SGB Steuerungstechnik GmbH

5.6.2 Herstellung von Testelementen

Auf Grundlage einer umfassenden Planung wurden beim Metallbauer „BOBO Produktions- und Vertriebsgesellschaft mbH" zunächst Testfräsungen mit Aluminiumverbundplatten durchgeführt. Das Ergebnis war bereits sehr zufriedenstellend, da sich zeigte, dass die vorgesehenen, teilweise bis zu 25° spitzen, Faltfräsungen realisierbar waren und die Optik des gefalteten Metallmoduls den Vorstellungen der Planer entsprach (vgl. Abb. 92).

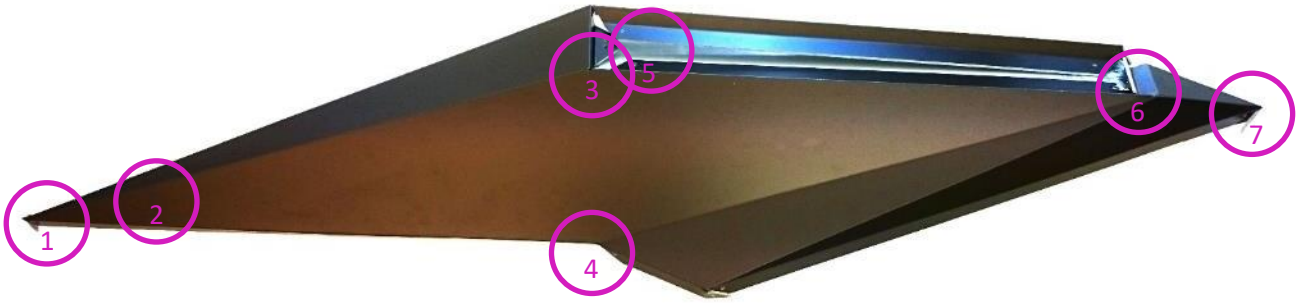


Abb. 92: gefaltetes Testelement | Foto: S. Knechtges, ai:L

Durch die hergestellten Testelemente konnten mehrere Verbesserungen für die Herstellung des finalen Demonstrators vorgenommen werden, die nachfolgend beschrieben sind.

Nr. 1		Die linke Spitze des Elements besitzt einen sehr kleinen Winkel von nur 31°. Ursprünglich sollten die beiden seitlichen Schenkel durch eine rückseitig angebrachte Verbindungplatte, welche mit den Schenkeln vernietet ist, verbunden werden. Die Anbringung der Verbindungplatte an der Innenseite war jedoch nicht möglich, da durch die Materialstärke der Aluminiumverbundplatte kein Platz mehr in der Spitze vorhanden war. Die finale Umsetzung erfolgte deshalb, indem die 3 cm breiten Schenkel an der Spitze auf Gehrung geschnitten wurden, sodass beim Falten eine offene Stoßfuge entsteht. Das zusammenhalten der Ecke erfolgt durch vernieten auf der Rückseite.
Nr. 2		Die rückseitig angebrachte Verbindungsplatte verdrehte sich aufgrund von ursprünglich nur 2 vorgesehen Nietverbindungen, sodass die beiden Schenkel nicht formschlüssig verbunden waren. Dies kann zu einer Verformung des gesamten Elementes führen, weshalb rückseitig eine Verbindungplatte mit 4 Nieten vorgesehen wurde.

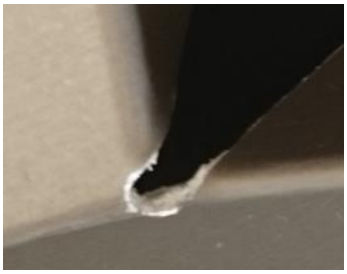
Nr. 3		Beim Ausschneiden der Eckkante wurde zu viel Material entfernt. In der Zeichnung für den finalen Demonstrator wurde der Eckschnitt deshalb kürzer ausgeführt.
Nr. 4		Bei der unteren Ecke bestand das Problem, dass es bei der Abwicklung des Elementes einer Überlappung bedurft hätte, um das fehlende Material zu ergänzen, dies jedoch nicht umsetzbar ist. Die Idee bestand deshalb zunächst darin, ein etwas größeres Passstück in die Ecke einzusetzen und dieses rechts und links festzunieten. Dies hätte jedoch bedeutet, dass die Nieten sichtbar gewesen wären. Umgesetzt wurde deshalb eine Lösung, bei der die fehlende Ecke eingeklebt wurde. Dies führte zu optisch ansprechenderen Ergebnissen.
Nr. 5		Der Überstand einer Niete über dem Blech beträgt ca. 2 mm. Diese Höhe wurde bei der Berechnung der Rahmentiefe für das PV-Modul zunächst jedoch nicht mit berücksichtigt. In der Folge wurde der Schenkel der Einbuchtung deshalb ein wenig tiefer ausgebildet.
Nr. 6		Da der Eckschnitt nicht weit genug ausgeführt wurde, riss das Material bei der Faltung ein. Entsprechend wurde der Schnitt später einfach ein wenig weitergeführt (jedoch nicht zu weit, sonst entsteht Problem Nr. 3).
Nr. 7		Die rechte Ecke des Elementes hat das gleiche Problem wie die linke. Der Winkel verläuft so spitz, dass an den Schenkeln eine rückseitige Anbringung einer Verbindungsplatte nicht möglich ist, da der vorhandene Platz durch die Materialdicke der Aluminiumverbundplatte ausfüllt ist. Die Schenkel wurden deshalb an der Spitze erneut auf Gehrung geschnitten.

Abb. 93 Nr. 1 bis 7: Detailbilder des Testelements | Fotos: S. Knechtges, ai:L

5.6.3 Finaler Demonstrator

Für die Umsetzung einer komplex gefalteten Fassade, wie sie im SOLAR*shell*-Demonstrator umgesetzt wurde, eignen sich Aluminiumverbundplatten sehr gut. Die Faltungen konnten durch rückseitige Fräsungen maßgenau realisiert werden. Auch bestand die Möglichkeit, Öffnungen in die Aluminiumverbundplatte zu fräsen, durch die ein einfaches Befestigungssystem mit Schlüssellochprinzip umgesetzt werden konnte. Aus dem Fassadenmaterial wurde zugleich auch eine Aufnahme für die PV-Module ausgeformt, in die die Solarkomponenten justierbar eingesetzt werden können.
Für die entwickelte Fassade (vgl. Abb. 94 bis Abb. 99) besteht noch keine bauaufsichtliche Zulassung. Diese bedarf umfangreicher statischer Nachweise und Prüfungen, die in einem nächsten Schritt erfolgen müssen.

Abb. 94: Westfassaden-Element | Foto: S. Huth, ai:L

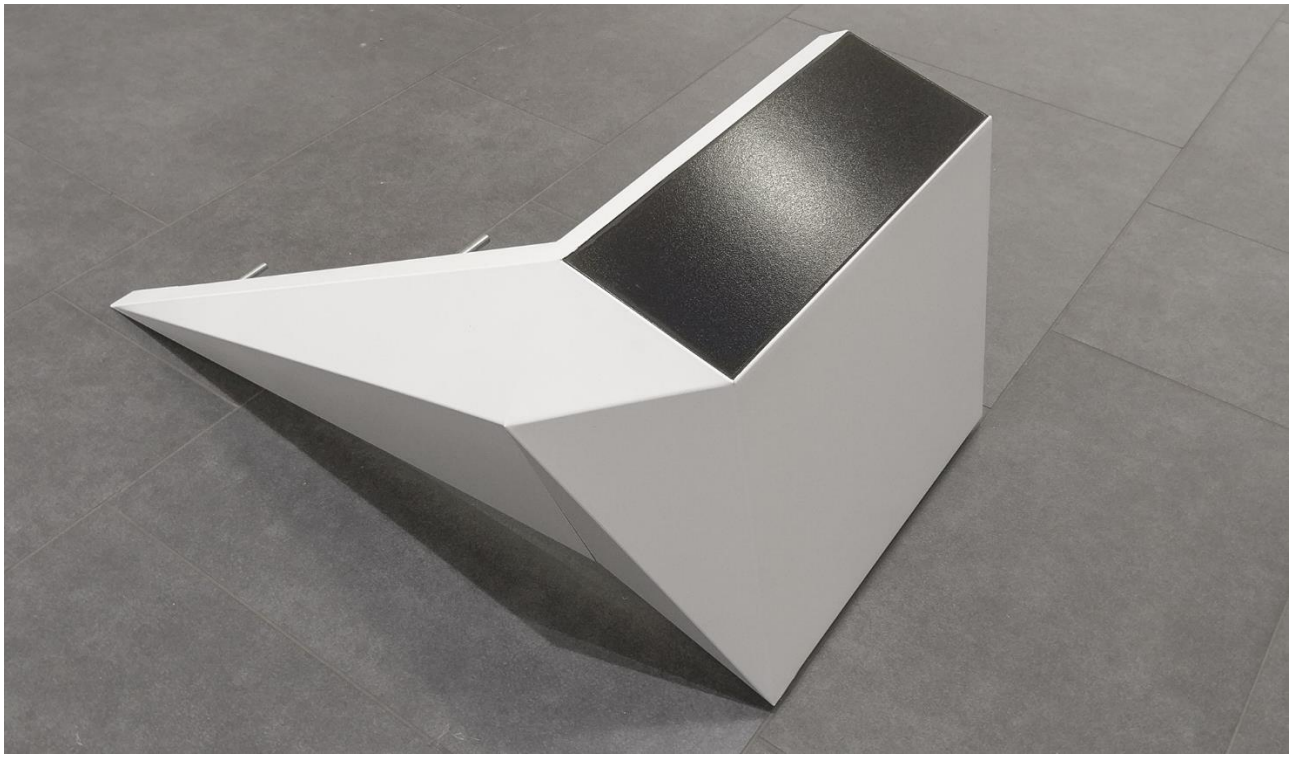


Abb. 95: Eck-/ Südfassaden-Element | Foto: S. Huth, ai:L

Abb. 96; Demonstrator an der HTWK Leipzig | Foto: S. Huth, ai:L

Abb. 97: Demonstrator an der HTWK Leipzig, Blick auf die Westfassade | Foto: S. Huth, ai:L

Abb. 98: Demonstrator an der HTWK Leipzig, Blick auf die Süd-West-Ecke | Foto: A. Heller, ai:L

Abb. 99: Demonstrator an der HTWK Leipzig, Detail der Süd-West-Ecke | Foto: A. Heller, ai:L

6 Planungstool für Architekten

Um die SOLAR*shell*-Vision zu unterstützen, Energie zukünftig am Ort des Verbrauches (an Gebäuden) erzeugen zu können, wurde aufgrund der Komplexität des Themas „solar optimierte BIPV" ein Planungstool konzipiert. Es soll die Einstiegsbarrieren zur Planung und Umsetzung minimieren, indem der Planer auf technische Möglichkeiten hingewiesen wird, Designanregungen erhält und sich über aktuell verfügbare oder in Entwicklung befindliche Technologien informieren kann. Dies ist ein wichtiger Schritt in Richtung größerer Akzeptanz von PV-Fassaden – auf Planer- und Nutzerseite. Oft noch werden Ideen zur PV-Integration in Gebäude verworfen, was mit dem sehr technischen Aussehen der Module, ihrer optischen Dominanz in der Fassade sowie dem geringeren Stromertrag in der Fassade zusammenhängen könnte. Das Planungstool ist dazu gedacht, einen Ideenpool zu eröffnen und den Nutzer in allen Belangen der BIPV zu informieren. Das digitale Tool ist derzeit noch zweistufig. Es soll in einem Folgeprojekt jedoch zu einem mehrstufigen Online-Ideen-, Informations- und Wirtschaftlichkeitstool für Planer ausgebaut werden.

<u>Stufe 1:</u>

Durch eine Auswahlmaske (vgl. Abb. 100) kann der Nutzer im Planungstool zunächst seine gestalterischen Vorstellungen zur PV-Fassade spezifizieren. Das bedeutet, dass er nach eigener Priorität in der Auswahlmaske ausgehend von der Fassadenbauweise, dem Fassadenmaterial, der Fassadenform, der PV-Modultechnik, dem Machbarkeitsstatus oder ausgehend von bereits entwickelten PV-Fassadenentwürfen beginnen kann. Aufgrund des gewählten Kriteriums entfallen in den weiteren Themengruppen dann ggf. einige Varianten, da nicht alle Kombinationen bautechnisch umsetzbar sind (si. Beispiel in Abb. 101). Falls der Architekt noch keine konkrete Vorstellung seiner Fassade hat, kann er sich im Weiteren inspirieren lassen.

Abb. 100: Auswahlmaske des Planungstools | Grafik: S. Knechtges, ai:L

Abb. 101: Auswahlmaske mit gewähltem Fassadenmaterial Metall | Grafik: S. Knechtges, ai:L

Stufe 2:

Nach Einschränkung der weiteren Auswahlkriterien wird eine Informationsübersicht zu Entwurfsbeispielen bzw. Beispielfassaden ausgegeben. Der Informationsinhalt zu Entwürfen und Fassadenbeispielen könnte wie in Abb. 102 gezeigt aussehen oder noch ergänzt werden.

Abb. 102: Beispiel für eine Informationsübersicht nach gewählten Kriterien, Quelle: S. Knechtges, ai:L

Die Vision für ein zukünftiges Projekt wäre es, das Planungstool noch auszubauen und mit ihm ein Onlinetool für Planer zu entwickeln, das noch detailliertere bzw. weitreichendere Informationen zur Verfügung stellen kann (z. B. Nachhaltigkeit, Kostenrahmen, Installationshinweise oder aktuelle Einspeisevergütungen).

7 Fazit

Die im Projekt angestrebten Ziele - Evaluierung von parametrisch-generativen Prinzipien, PV-Technologien, Fassadenmaterialien & -systemen hinsichtlich ihrer Eignung für die optimierte Architekturfassaden, Entwicklung und konstruktive Ausarbeitung von Lösungsvarianten für Architekturfassaden und Bau eines Demonstrators - wurden im SOLAR*shell* vollständig erreicht. Dabei stand die Gestaltungsqualität der neuen Fassaden im Vordergrund. Durch optimale Ausnutzung der integrierten kleinteiligen PV konnte deren Ertrag maximiert werden: gegenüber „klassisch" vertikal installierten Modulen zwischen 40 und 55 % (je Quadratmeter eingesetzter PV-Fläche). Zudem konnte die generelle Machbarkeit solar optimierter Architekturfassaden nachgewiesen werden, deren Entwürfe direkt vom eingesetzten Fassadenmaterial abhängig sind. Weil jedes der Fassaden- und PV-Materialien eigene Voraussetzungen und Möglichkeiten für optimierte BIPV mitbringt, besteht hier das Potential für separate, materialspezifische Anschlussprojekte, um materialgerechte Optimierungsprinzipien und Konstruktionen auszuarbeiten bzw. zu vertiefen.
Das im Projekt genutzte Software-Paket bestehend aus „Rhinoceros", „Grasshopper" und „DIVA" ist rückblickend gut geeignet, um Berechnungen zur solaren Optimierung einer Fassade durchzuführen. Dabei kann sowohl ein Fassadenausschnitt, als auch eine komplette Fassaden betrachtet werden. Die programmintegrierten Engines, die die Rechenprozesse durchführen, erzielten im Projekt konstant gute Leistungen und genaue Werte. Diese wurden durch Vergleichssimulationen mit dem Programm „Ladybug" gegengeprüft. Die Ergebnisse des rechenintensiven Prozesses von solarer Evaluierung und Optimierung einer Fassade werden genauer, je feiner das Berechnungs-Grid aufgelöst wird und je länger die Optimierungsalgorithmen laufen. Damit verlängern sich automatisch jedoch auch die Rechenzeiten. Es gilt, hier einen praktikablen Mittelweg zu finden.
Aufgrund der Komplexität der Thematik solar optimierter BIPV mit den verschiedenen möglichen Fassaden- und PV-Technologien, Materialien, Optimierungsprinzipien und Designmöglichkeiten sind im SOLAR*shell* erste Ideen und Umsetzungskonzepte für ein Planungstool entstanden. Dieses soll einen thematischen Einstieg für Planer und Bauherren bieten und helfen, Hemmschwellen zum Einsatz von PV im Fassadenkontext abzubauen. Dieser Ansatz besitzt das Potential, in einem separaten Projekt überprüft und weiterentwickelt zu werden.
Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass großes Potential in solar optimierten PV-Fassaden steckt. Mit dem Einsatz kleinteiliger anstatt großer Standard-PV-Formate wird es möglich, besser auf gestalterische Anforderungen des Planers einzugehen. Zudem kann auch mit nicht optimal zur Sonne ausgerichteten Fassadenflächen ein Maximum an solarem Stromertrag erzielt werden. Innovative Fassaden wie diese könnten die Zukunft für die BIPV sein. Mit neuen innovativen Strategien können so für die gebäudeintegrierte PV neue Produkte entstehen, anstatt den Konkurrenzkampf im Standardproduktsegment weiterzuführen. Die deutsche Solarbranche könnte mit einer Wertschöpfung im Bereich Entwicklung, Fertigung und Dienstleistungen für innovative solar optimierte BIPV-Produkte wieder eine Vorreiterposition einnehmen.

8 Quellennachweise

Agentur für Erneuerbare Energien. (2016). *www.unendlich-viel-energie.de*. Retrieved Sept. 7, 2016, from https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/kostenentwicklung-photovoltaik

Agkathidis, A., Hudert, M., & Schilling, G. (2009). *Form defining strategies* (2., veränderte Auflage ed.). Wasmuth, E.

Alt, F. (2004). *Krieg um Öl oder Frieden durch die Sonne.* München: Goldmann Verlag.

Aranda, B., & Lasch, C. (2008). *Rules of Six.* MoMA.

ASHRAE Research Project 1015. (n.d.). *https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/DEU//DEU_Berlin.103840_IWEC*. Retrieved 2016

Bagda, D. E., Brandau, K., Flohr, S., Horn, S., Roos, M., Vaupel, G., & Weller, B. (2016). Photovoltaik Fassaden Leitfaden zur Planung. DAW SE und GWT -TUD GmbH.

BauNetz Media GmbH. (2016, Sept. 13). *Baunetz Wissen - Das Online-Fachlexikon*. Retrieved from http://www.baunetzwissen.de/index.html

BINE Informationsdienst. (2005). *BINE Informationsdienst*. Retrieved from http://www.bine.info/publikationen/publikation/photovoltaik-innovationen-bei-solarzellen-und-modulen/solarmodultechnik/)

Bohnacker, H., Groß, B., Laub, J., & Lazzeroni, C. (2010). *Generative Gestaltung.* Mainz: Schmidt.

Bundesverband Solarwirtschaft. (2016). Informationspapier des BSW-Solar: ENERGIEEINSPARVERORDNUNG 2016.

C. Ipser, T. S. (2012). *Planungsleitfaden Plusenergie, Energieeffizienz und gebäudeintegrierte regenerative, Energieträgertechnologien in Vorentwurf und Entwurf, Entwurfsleitfaden Photovoltaik.* Abteilung für Energie- und Umwelttechnol. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Retrieved 08 16, 2016, from https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/endbericht_1256_annex_b_grundlagen.pdf

Deutsche Bundesregierung. (2017, 02 22). *www.bundesregierung.de*. Retrieved from https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html

DGNB. (2016). *DGNB Kriterien*. Retrieved from http://www.dgnb-system.de/de/system/kriterien/neubau_gebaeude/

DIN EN 61730-1:2015-02. (n.d.). Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction (IEC 82/828/CD:2014).

Dirnberger, D. (2013). *Target Costing und die Rolle des Controllings im Zielkostenmanagement.* München: GRIN Verlag GmbH.

DUDEN. (2016). *Wortbedeutung: Algorithmus*. Retrieved from DUDEN Online Wörterbuch: www.duden.de

DUDEN. (2016). *Wortbedeutung: Parameter*. Retrieved from DUDEN Online Wörterbuch: www.duden.de

Ebert, T., Eßig, N., & Hauser, G. (2010). *Zertifizierungssysteme für Gebäude - Nachhaltigkeit bewerten, Internationaler Systemvergleich, Zertifizierung und Ökonomie.* München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

El Khouli, S., John, V., & Zeumer, M. (2014). *Nachhaltig konstruieren.* München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

energie-experten.org. (2016). *Funktionsprinzip und Arten von Tandem-Solarzellen*. Retrieved from http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/solarenergie/solarzelle/tandem-solarzelle.html

Europäisches Parlament. (2010). Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung). Brüssel.

Fraunhofer ISE. (2016). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg.

Fraunhofer ISE. (2016). *Presseinformation 2010 - FEE-Innovationspreis*. Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/archiv-unserer-presseinformationen/presseinformationen-2010/fraunhofer-ise-forscher-belegen-zweiten-platz-beim-fee-innovationspreis-energie-41-1-rekordwirkungsgrad-fuer-solarzellen-ern

G. Hausladen, M. d. (2006). *ClimaSkin - Konzepte für Gebäudehüllen, die mit weniger Energie mehr leisten.* München: Callwey.

Gockell, B. (1964). Dissertation: Über die Verwendung von vorgehängten Fassaden (Curtain Walls) in gestalterischer, konstruktiver und technischer Hinsicht.

Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2004). *Fassaden Atlas.* München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.

Kaltenborn, T., Fiedler, H., Lanwehr, R., & Melles, T. (2013). *Conjoint-Analyse.* München und Mering: Rainer Hampp Verlag.

Khabazi, Z. (2012). Generative Algorithms (using Grasshopper).

Khouli, S. E., John, V., & Zeumer, M. (2014). *Nachhaltig konstruieren.* München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

Kreißig, J. (2013). *Gebäude- Ökobilanzen in Planung und Zertifizierung.* PE International AG, BAU.

Meyer, A., Schwaiger, M., & Fuchs, S. (2009). *Theorien und Methoden der Betriebswirtschaft, Handbuch für Wissenschaftler und Studierende.* München: Franz Vahlen.

Odersun. (2011). Leitfaden für BIPV-Projekte. Frankfurt/Oder.

Pech, A., Pommer, G., & Zeininger, J. (2014). *Fassaden.* Wien: Birkhäuser.

Prituzhalova, O. (n.d.). *Analyse des Lebenszyklus einer Verpackung anhand der Ökobilanzen.* Lüneburg.

Raumordnung, B. f. (n.d.). *Leitfaden für nachhaltiges Bauen, 2001.*

S. Roberts, N. G. (2009). Gebäudeintegrierte Photovoltaik - Ein Handbuch. Basel.

Schmitz, S., & Paulini, I. (1999). *Bewertung in Ökobilanzen Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043.* Berlin: Umweltbundesamt.

Siman, R., & Nicolo, g. (2009). *Gebäudeintegrierte Photovoltaik/ Ein Handbuch.* Berlin: Birkhäuser Verlag AG.

SolarServer. (2017). *www.SolarServer.de*. Retrieved from https://www.solarserver.de/solarmagazin/solar-report_1108_2.html

Solaxess. (2016). *Kategorienpreis Bauten & Wohnen – Zurich Klimapreis 2016*. Retrieved 08 25, 2017, from https://www.youtube.com/watch?v=a-9lUnBIDwc&feature=player_embedded

Stahl, B. (1998). *Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen.* Bremen.

United Nations, D. o. (2014). World Urbanisation Prospects .

Universität Freiburg. (2016). *Farbstoffsolarzellen*. Retrieved from http://www.fmf.uni-freiburg.de/projekte/pg_energie/solar/farbstoffsolarzellen

Weller, B., Hemmerle, C., Jakubetz, S., & Unnewehr, S. (2009). *Photovoltaik: Technik, Produkte, Details.* München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

Welsch, M. (2011). *Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen als Bestandteile des Nachhaltigkeitskonzepts des BMVBS* (2. Fachtagung Nachhaltiges Bauen der Brandenburgischen Ingenieurkammer ed.). Potsdam : Geschäftsstelle Nachhaltiges Bauen im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Würth Solar. (2012). GeneCIS im architektonischen Kontext. Schwaebisch Hall.

Normen, Richtlinien und Verordnungen:

2014/35/EU:2014-02-26, Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

DIN 18516-1:2010-06, Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze

DIN 4109-1/A1:2017-01, Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen; Änderung A1

DIN 4109-1:2016-07, Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen

DIN 4109-2/A1:2017-01 – Entwurf, Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen; Änderung A1

DIN 4109-2:2016-07, Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen

DIN EN 12600:2003-04, Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung EN 12600:2002

DIN EN 12758:2011-04, Glas im Bauwesen - Glas und Luftschalldämmung - Produktbeschreibungen und Bestimmung der Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 12758:2011

DIN EN 13501-1:2010-01, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009

DIN EN 14449:2005-07, Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Konformitätsbewertung/Produktnorm; Deutsche Fassung EN 14449:2005

DIN EN 1991-1-3:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009

DIN EN 1991-1-4:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010

DIN EN 1991-1-7:2010-12, Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010

DIN EN 50380:2003-09, Datenblatt- und Typschildangaben von Photovoltaik-Modulen; Deutsche Fassung EN 50380:2003

DIN EN 50583-1:2016-10; Photovoltaik im Bauwesen - Teil 1: BIPV-Module; Deutsche Fassung EN 50583-1:2016

DIN EN 61140:2016-11, Schutz gegen elektrischen Schlag - Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel (IEC 61140:2016); Deutsche Fassung EN 61140:2016

DIN EN 61215:2012-07, Terrestrische kristalline Silizium-Photovoltaik-(PV-)Module - Bauarteignung und Bauartzulassung (IEC 82/684/CD:2011)

DIN EN 61646:2009-03, Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik (PV)-Module - Bauarteignung und Bauartzulassung (IEC 61646:2008); Deutsche Fassung EN 61646:2008

DIN EN 61730-1:2015-02, Photovoltaik (PV-)Module - Sicherheitsqualifikation – Teil 1: Anforderungen an den Aufbau (IEC 82/828/CD:2014)

DIN EN 61730-2:2012-11, Photovoltaik(PV)-Module - Sicherheitsqualifikation - Teil 2: Anforderungen an die Prüfung (IEC 82/663/CD:2011)

DIN EN 62790:2016-02, Anschlussdosen für Photovoltaik-Module - Sicherheitsanforderungen und Prüfungen (IEC 62790:2014); Deutsche Fassung EN 62790:2015

DIN EN 62852:2015-10, Steckverbinder für Gleichspannungsanwendungen in Photovoltaik-Systemen - Sicherheitsanforderungen und Prüfungen (IEC 62852:2014); Deutsche Fassung EN 62852:2015

DIN EN ISO 12543-2:2011-12, Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas (ISO 12543-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 12543-2:2011

DIN EN ISO 12543-3:2011-12, Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 3: Verbundglas (ISO 12543-3:2011); Deutsche Fassung EN ISO 12543-3:2011

EUV 305/2011:2011-03-09, Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates

DIN EN 13022-1, Glas im Bauwesen – Geklebte Verglasungen – Teil 1: Glasprodukte für Structural-Sealant-Glazing (SSG) Glaskonstruktionen für Einfachverglasungen und Mehrfachverglasungen mit oder ohne Abtragung des Eigengewichtes; Deutsche Fassung EN 13022-1:2014

Bildnachweise zu Tab. 2

Organische PV:

Bild „flexible OPV": Heliatek GmbH, *www.heliatek.com/de/solarfolien/einzigartig*, 27.07.2017

Bild „farbige OPV-Zellen": Buch der Synergie, *www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_fotos_ok/ sonnenenergie/095w_dye_solar_cell.jpg;*, 27.07.2017

Bild „freie Form“: Opvius GmbH, *www.opvius.com/assets/images/a/OPVIUS_PM_2014-02-11_BGT-BELECTRIC-f8cf08aa.jpg*, 27.07.2017

Bild „transparent“: Energie Experten *www.energie-experten.org/fileadmin/_processed_/csm_Solarenergie_ Solaranlage_Photovoltaik-Fassade_organische_Photovoltaik-Zelle_Foto_Heliatek_GmbH_0de50de6c5.jpg*, 27.07.2017

Silizium-Glas-Glas-PV:

Bilder „mono- & polykristalline Zellen“: G-KEYS Light & SolarFlex-Us, *www.solarflex-us.de/portfolio/kristallaufbau-von-solarzellen/*, 27.07.2017 & *www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/vergleich*, 27.07.2017

Bild „farbige kristalline PV-Zellen“: PVACCEPT, Berlin, Baunetzwissen, *www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/pv-module/farbige-pv-module-165748,* 27.07.2017

Bild „strukturiertes Glas (matt)“: GlobalSources, *p.globalsources.com/IMAGES/PDT/B1045867702/solar-glassUltra-clear-float-prismatic-matt.jpg*, 27.07.2017

Bild „Muster“: CSEM SA 2015, Presentation PV Days in Halle 27.09.2016 von Karin Söderström, Colored photovoltaic modules

Bildnachweise zu Tab. 4

Holz:

Bild „horizontale Lattung“: Friederike Huber *www.holzbau-huber.at/Bilder/Holzfassaden/bilder/holzfassade02.jpg*, 30.08.2017

Bild „verwittert“: Pixabay, *pixabay.com/de/hintergrund-holz-wand-l%C3%A4rche-1636917/,* 01.12.2017

Bild „lasiert“: Färgriket, *fargriket.com/butik/inomhus/vaggar-och-tak/forarbete-behandling-av-traytor/bets/.* 30.08.2017

Bild „geschliffen“: Pixabay, *pixabay.com/de/holz-verkleidung-textur-fassade-275854/*, 30.08.2017

Bild „gebogen“: Pixabay, *pixabay.com/de/fassade-holz-architektur-haus-1405240/,* 30.08.2017

Naturstein:

Bild „großformatige Platten“: Baulinks, *www.baulinks.de/webplugin/2008/i/scaled/800_x_1803-sto1.jpg*, 30.08.2017

Bilder natürliche Farbvarianzen: Kerana Keramik- und Natursteinhandel GmbH, *kerana.de/bilder/Bd/Naturstein_Natursteine_Sandstein_Fliesen_Platten_11510.jpg* & *kerana.de/bilder/Bd/Naturstein_Natursteine_Sandstein_Fliesen_Platten_117.jpg*, 30.08.2017

Bild „gebeilt“: Wesling Obernkirchener Sandstein GmbH & Co KG, *upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Obernkirchener-gebeilt.jpg/300px-Obernkirchener-gebeilt.jpg,* 30.08.2017

Bild „trianguliert“: Wikipedia, *en.wikipedia.org/wiki/Federation_Square#/media/File:Federation-square-sandstone-facade.jpg,* 30.08.2017

Ziegel:

Bild „Mauerwerksverband“: BauWohnWelt*, www.bauwohnwelt.at/images/artikel/000/000/943/gross/ziegel.jpg*, 30.08.2017

Bild „Ziegel- & Fugenfarbe“: Vandersanden Group, *www.vandersandengroup.be/sites/default/files/images_tip/effect_vd_voeg.jpg*, 30.08.2017

Bild „glatt“: Pixabay, *pixabay.com/de/durch-die-wand-ziegel-bau-zement-427649/*, 30.08.2017

Bild „strukturiert“: Pixabay, *pixabay.com/de/banner-kopfzeile-durch-die-wand-1559392*, 30.08.2017

Bild „herausgedreht“: i.pinimg, *i.pinimg.com/736x/45/b8/56/45b8567ea9bd37e11ce273deb713f844.jpg*, 30.08.2017

Beton:

Bild „glatt geschalt“: Chapes-75.fr, *chapes-75.fr/wp-content/uploads/2014/04/b%C3%A9ton-chapes-75.jpg*, 30.08.2017

Bilder „durchgefärbt“: Parketthandel 24, *www.parketthandel24.de/Fliesen-Betonoptik-60x60-BETONTECH-White-lichtgrau.html*, 30.08.2017

Bild „Strukturmatrize“: Reckli *GmbH, www.reckli.com/fileadmin/_processed_/csm_2-203_Samara_grey_1c7718e6da.jpg*, 30.08.2017

Bild „geschliffen & poliert“: KTG Fußbodentechnik, *ktg-fussbodentechnik.de/attachments/Slider/31a436d1-7f9f-a74f-08e7-11876471e1b3/Foto%282%29.JPG?template=generic*, 30.08.2017

Bild „3D-Struktur“: Baier Bischofsberger Architects, *www.baierbischofberger.ch/en/architecture/noppenhalle*, 30.08.2017

Putz:

Bild „fein gekörnt“: Sto SE & Co. KGaA, *www.zukunft-fassade.de/de/zukunft-fassade/oberflaechen/putz/*, 30.08.2017

Bilder fein gekörnt“, „durchgefärbt“, „grafisch“ & „rau“: Sto SE & Co. KGaA, *www.zukunft-fassade.de/de/zukunft-fassade/oberflaechen/putz/*, 30.08.2017

Bild „gerillt“: *images.adsttc.com/media/images/505b/f591/28ba/0d56/ff00/0222/large_jpg/stringio.jpg?1414196592,* 30.08.2017

Bild „Freiformen“: AZ/Architekturzeitung, *www.architekturzeitung.com/azbilder/2012/1205/12-27-ECOLA-Award-2012-Barcelona2.jpg,* 30.08.2017

Metall:

Bild „gebürstet“: Kamino AG, *www.kamino.ch/_upl/images/metall.jpg*, 30.08.2017

Bild „farbig beschichtet“: 3A Composites GmbH, *www.alucobond.com/metallic-colours.html?&L=0,* 30.08.2017

Bild „wölbstrukturiert“: Foto: S. Knechtges, ai:L

Bild „gefaltet“: Dom Mody Klif Shopping Centre, *www.baunetzwissen.de/fassade/tipps/news-produkte/fassaden-formteile-aus-acryl-3924679*, 30.08.2017